

MZG-Rindbach

Ersterhebung flächiger Standortdaten im forstlich geprägten Modell-
Wildbacheinzugsgebiet Rindbach als Grundlage für ein integrales
Einzugsgebietsmanagements.

Impressum

Projektnehmer:in: Universität für Bodenkultur Wien, Department für Landschaft, Wasser und Infrastruktur, Inst. f. Alpine Naturgefahren

Adresse: Peter-Jordan-Straße 82, 1190-Wien

Projektleiter:in: Dr. Christian Scheidl

Tel.: +43-01/47654-87116

E-Mail: christian.scheidl@boku.ac.at

Kooperationspartner:in: Bundesforschungszentrum für Wald (BFW)

BFW-Teilprojektleiterin: Dr. Michaela Teich

E-Mail: michaela.teich@bfw.gv.at

Finanzierungsstelle(n): österreichischer Waldfonds

Projektlaufzeit: 1.5.2022 – 30.9.2025

1. Auflage

Fotonachweis: Cover: Christoph Lainer, Christian Scheidl



Wien, 2025. Stand: 30. September 2025

Vorwort

Der Klimawandel und die zunehmende Besiedlung alpiner Gebiete verändern das Auftreten und das Ausmaß von Naturereignissen mit oft verheerenden Folgen. So werden immer häufiger kritische Niederschlagsmengen in kurzer Zeit beobachtet, wodurch Geschiebeherde – auch in entlegeneren Bereichen von Wildbacheinzugsgebieten – mobilisiert werden können. Ablagerungen von Lawinen und Wildholz erhöhen die Gefahr durch Verklausungen bei Hochwasser. Gleichzeitig ist die Schutzwirkung des Waldes gegen Naturgefahren vielerorts durch starke Überalterung oder zunehmende Störungen durch Wind, Feuer oder Insektenbefall reduziert. Herausforderungen welche eine Adaption und Erweiterung des bisherigen Wissensstandes über die Schutzwirkung von Waldökosysteme in steilen Lagen hinsichtlich der Reduktion des Risikos vor Naturereignissen notwendig machen. Aus diesem Grund wurde vom Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft (BML), im Zuge des Aktionsprogrammes "Wald schützt uns!", das Einzugsgebiet des Rindbaches in der Gemeinde Ebensee, OÖ als Modelleinzugsgebiet initiierte. Ziel dieses interdisziplinären Projektkonsortiums war die Beschaffung der wichtigsten Grundlagendaten, um sie der wissenschaftlichen Gemeinschaft und anderen Interessierten zugänglich zu machen. Die erhobenen Daten sind auf der Plattform ZENODO bereitgestellt.

Die Verfasser möchten sich beim Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Klima- und Umweltschutz, Regionen und Wasserwirtschaft (BMLUK) sowie den Österreichischen Bundesforsten (ÖBf) als Grundeigentümer und der Wildbach- und Lawinenverbauung (WLV), bedanken. Unser aufrichtiger Dank gilt zudem allen Personen, die durch ihre Unterstützung bei der Durchführung der Feldarbeiten sowie durch die Bereitstellung von Material, Daten und Informationen die Erstellung des vorliegenden Berichts erst ermöglicht haben. Insbesondere möchten wir folgenden Personen für ihr Engagement und Unterstützung danken:

Florian Hader (FAST-Traunkirchen), Bianka Ganzenbacher (FAST-Traunkirchen), Christian Brunner (FAST-Traunkirchen), Laurenz Aschauer (ÖBf), Martin Wiesauer (ÖBf), Hellen David (ÖBf), Johannes Appesbacher (Jagdgesellschaft Rindbach), Christian Pürstinger (WLV-OÖ), Valerie Oswald (WLV-OÖ), Christoph Lainer (vormals WLV)

Mit freundlichen Grüßen

Christian Scheidl

i.V. des gesamten Projektkonsortiums

Inhalt

Vorwort	3
Hintergrund	6
Rindbach Einzugsgebiet.....	6
Ein Naturlaboratorium auf lange Zeit	9
Grundlagenerhebung in den ersten drei Jahren.	12
AP 1: Projektmanagement	12
AP 2: Datenmanagement	14
AP 3: Geologie und Hydrogeologie	15
Spezielle Literatur.....	15
Erhebung bestehender digitaler Raumdaten.....	16
Feldaufnahmen und Laborarbeiten	18
Datenauswertung.....	20
AP 4: Boden und Standort	45
Vorstratifizierung des Projektgebietes für die Probeflächenauswahl	45
Bodenbeschreibung und- probenahme	48
Laboranalysen	49
Datenauswertung.....	52
Zusammenfassung.....	61
AP 5.1: Allgemeine Landnutzung/Landbedeckung-Stoffkreislaufmodellierung	62
BIOME-BGC Simulation	62
Zusammenfassung.....	64
AP 5.2: Allgemeine Landnutzung/Landbedeckung-Erschließung	66
Feldaufnahmen	67
Drohnenbefliegungen mit Laserscanner	71
Photogrammetrische Aufnahmen.....	72
Bestandeserhebung basierend auf Geodaten	74
Einfluss von Forststraßen auf die Abflussdynamik	77
Datenauswertung.....	80
Zusammenfassung.....	110
AP 5.3: Allgemeine Landnutzung/Landbedeckung-Gebirgshydrologie.....	116
Beregnungen, Abflussbeiwertkarten	116
Beregnungsversuche - Starkregensimulationen	117
Bodenphysikalische Kennwerte	119
Hydrologische Wirkung seitlicher Zubringer.....	119
Niederschlag und weitere meteorologische Daten	128

Ereignis-Identifikation	132
Datenauswertung.....	137
Zusammenfassung.....	171
AP 6: Spezielle Landnutzung-Wald	172
Quantifizierung von Ökosystemleistungen im Rahmen der Forsteinrichtung	172
Beurteilung des Regenerationszustandes im MEZG-Rindbach.....	177
Ergebnisse und Diskussion	197
AP 7.1: Naturgefahrenprozesse (Lawine).....	217
Methoden TEIL 1: Terrestrische Stichprobenaufnahmen im Schutzwald	218
Methoden TEIL 2: Erhebung schutzwirkungsrelevanter Merkmale aus drohnengestützten Fernerkundungsdaten	240
Methoden TEIL 3: Erhebung und Modellierung der aktuellen bzw. potenziellen Lawinensituation	259
Ergebnisse und Diskussion	270
Zusammenfassung.....	327
AP 7.2: Naturgefahren-Wildbach	328
Erhebung und Darstellung der Fließwege im MEZG-Rindbach.....	328
Geschiebefracht und abstrahiertes Gerinnesystem	330
Erstellung von Korngrößenverteilungskurven basierend auf Linienzahlanalysen.....	333
Abschätzung der Wildholzdisposition in Gerinnenähe im Modelleinzugsgebiet Rindbach mithilfe von Waldinventurdaten.....	335
Zusammenfassung und Ausblick	338
Tabellenverzeichnis.....	339
Abbildungsverzeichnis.....	342
Literaturverzeichnis	359
Anhang	381
AP 1 – Projektmanagement	381
AP 2 – Datenmanagement	384
AP 7 – Naturgefahren.....	389
Abkürzungen.....	405

Hintergrund

Integrales Einzugsgebietsmanagement hilft Schäden zu vermeiden. Im Rindbach bei Ebensee (OÖ) wird daher ein Modell-Wildbacheinzugsgebiet eingerichtet.

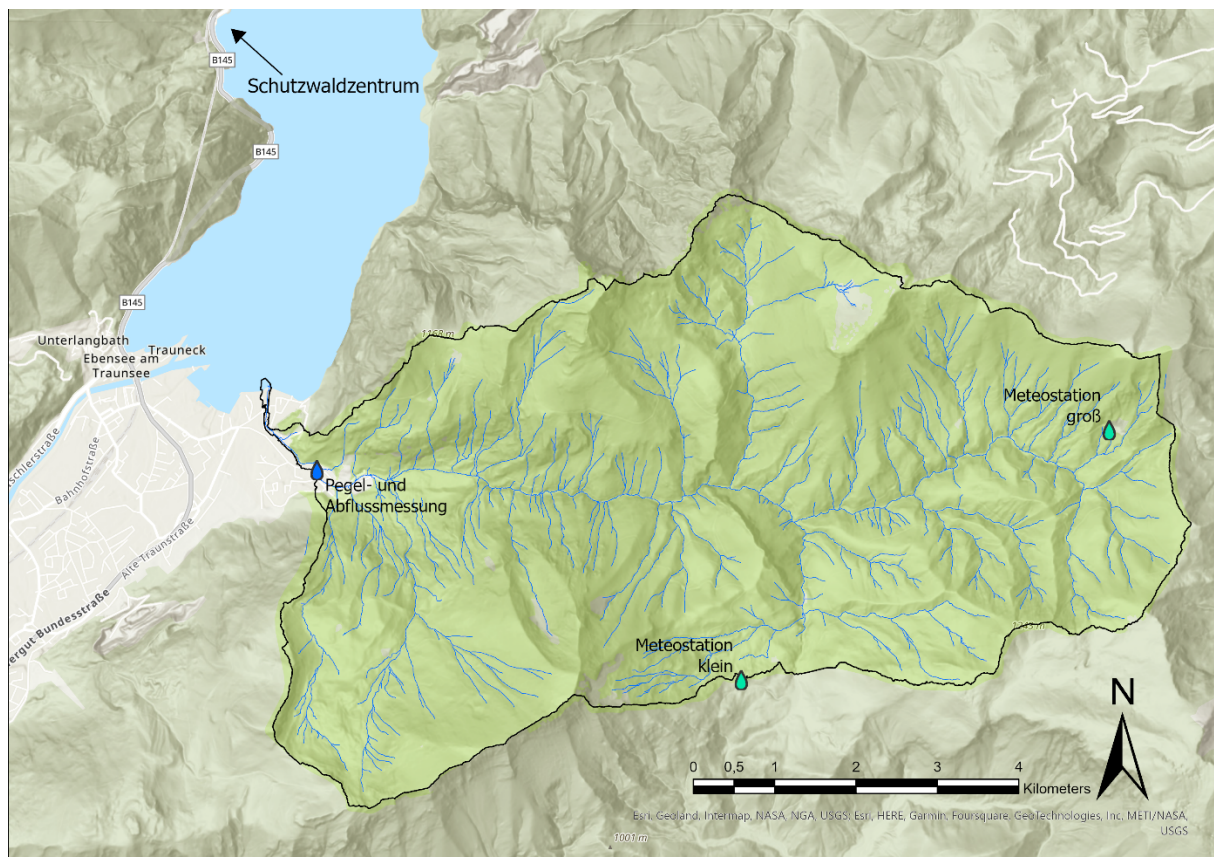
Anfang Juni 2013 wurden große Teile der Gemeinde Ebensee am Traunsee (OÖ) infolge starker Niederschläge übersaart. Bei diesem Hochwasser traten auch im Rindbach unzähligen Bachverwerfungen sowie enorme Geschiebeanlandungen und Verkläusungen durch mittransportiertes Unholz auf. Zahlreiche Brückenbauwerke (Strandbadsteg, Wasserfallwanderwegsteg; Loipernbrücke) sowie Querbauwerke (Sohlgurten) und Ufermauern entlang der gesamten Unterlaufregulierung wurden dabei beschädigt. Das Hochwasser 2013 setzte sich durch das ganze Siedlungsgebiet fort, wobei Teile aufgrund von Auflandungen und Rückstau durch den Traunsee oberhalb der Strandbadstraße ausbrachen und dadurch auch gerinneferne Flächen überflutet wurden. Eine besonders kritische Gefahrensituation konnte noch vor dem Hochwasserereignis 2013 entschärft werden. Im Winter 2009 lagerte eine auf einer Windwurffläche ausgelöste Lawine große Mengen an Wildholz im mittleren Gerinneabschnitt des Rindbachs ab (~1.000 fm). Durch rechtzeitige Räumung der Wildbach- und Lawinenverbauung (WLV) und den Österreichischen Bundesforsten (ÖBf) konnte diese große Menge an Unholz während des Hochwassereignisses 2013 nicht mehr mobilisiert und noch größere Schäden verhindert werden. Es zeigte sich allerdings, dass bezüglich der Entstehungsmechanismen von Hochwasserereignissen sowie kaskadierenden Naturgefahrenereignissen in bewaldeten Wildbacheinzugsgebieten, vor allem in den Kalkalpen noch große Wissensdefizite bestehen. Dies wurde von der Fachabteilung III/4 — Wildbach- und Lawinenverbauung und Schutzwaldpolitik des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft (BML) und der Wildbach- und Lawinenverbauung — Sektion Oberösterreich (WLV) zum Anlass genommen, das Einzugsgebiet des Rindbachs als Langzeit-Testgebiet auszuweisen und somit als Modell-Wildbacheinzugsgebiet einzurichten.

Rindbach Einzugsgebiet

Das Einzugsgebiet des Rindbachs liegt im Gemeindegebiet von Ebensee in Oberösterreich am Südufer des Traunsees und befindet sich zur Gänze im Kompetenzbereich der Wildbach-

und Lawinenverbauung. Die Größe des von Ost nach West verlaufenden Einzugsgebietes beträgt lt. Wildbachaufnahmeblatt 23,1 km² (Abbildung 1). Die höchste Erhebung bildet der Eibenberg mit 1.598 m ü.A. Die Mündung in den Traunsee befindet sich auf 422 m ü. A. Das mittlere Gefälle des Gerinnes liegt bei etwa 6 Prozent. Der Kegelbereich ist durchschnittlich mit 1,5 - 2 Prozent geneigt. Der Mittellauf versteilt sich auf 2-5 Prozent, während das Gerinne des obersten Einzugsgebietes ein mittleres Gefälle von 5-8 Prozent aufweist.

Abbildung 1 Einzugsgebiet des Rindbaches mit Lage der Pegel/abfluss- und meteorologischen Messstationen. Die grün hinterlegte Fläche zeigt das nahezu das gesamte Einzugsgebiet bewaldet ist.



Das Grundgestein im oberen Einzugsgebiet bilden Hauptdolomit und Plattenkalk mit z.T. mergeligen Schichten (Triasformationen), unterhalb des Rindbachfalls labilere Schichten aus verzahnten Hirlatz- und Spongienkalken (Jurakalke). Die Talverfüllungen bestehen aus Wildbachschutt und Moränenmaterial (Würm), sowie aus Alluvien des Trauntales im Mündungsbereich. Das Einzugsgebiet liegt im ozeanisch getönten Gebirgsklima mit einem mittleren Jahresniederschlag von ~1.700 mm. Der maximale bisher beobachtete Einzelnieder-

schlag vom 4.9.1922 beträgt 200 mm (Basisstation Ebensee, Messzeitraum: seit 1888). Kritische Wetterlagen bilden West-, Nord- und NW-Staulagen, die Gewitterzugrichtung verläuft West-Ost. (Hübl et al., 2013).

Ein Naturlaboratorium auf lange Zeit

Forschung und Lehre im Rindbach und ein Schutzwaldzentrum als „Basecamp“

Ziel des Modelleinzugsgebiet Rindbach ist es langfristige Erkenntnisse (30 Jahre) über geologische, hydrologische, hydraulische sowie forst- und bautechnische Zusammenhänge unter natürlichen Bedingungen zu erlangen und diese auch vor Ort zu vermitteln. Das Projekt MEZG-Rindbach schafft dafür fachspezifische Grundlagendaten unter Anwendung bestehender Erhebungskonzepte bzw. neu entwickelter Messkampagnen. Die ebenfalls notwendigen permanenten Messeinrichtungen wurden von der WLW in der ersten Projekthälfte installiert und vom Projektteam begleitet. Dabei handelt es sich um eine Pegel- sowie Abflussmessung des Rindbaches an der Jocherbrücke nahe dem Auslass des Einzugsgebietes sowie um zwei meteorologische Messstationen im Einzugsgebiet (vgl. Abbildung 1 und Abbildung 2).

Abbildung 2 Permanente Messstationen im MEZG-Rindbach. Links: Wasserstands- und Fließgeschwindigkeitsmessung an der Jocherbrücke. Rechts: Große Meteorologische Messstation im Einzugsgebiet.



Unterstützt wird das Vorhaben weiters vom Waldcampus Traunkirchen, in dem das neu etablierte Schutzwaldzentrum (Abbildung 3) – eine Kooperation zwischen der Wildbach- und Lawinenverbauung (WLW), Österreichische Bundesforste AG (ÖBf), Universität für Bodenkultur (BOKU) und Bundesforschungszentrum für Wald (BFW) – beheimatet ist.

Abbildung 3 Schutzwaldzentrum am Waldcampus Traunkirchen.



Die Räumlichkeiten des Schutzwaldzentrums bestehen aus einer Küche einem Besprechungsraum sowie einem Büroraum. Übernachtungsmöglichkeiten bestehen in der Forstlichen Ausbildungsstätte (FAST) welche ebenfalls am Waldcampus untergebracht ist. Im Zuge der ersten Projekthälfte hat sich das Schutzwaldzentrum am Waldcampus in Traunkirchen als zentraler Ausgangspunkt für wissenschaftliche Arbeiten, Exkursionen sowie Aus- und Weiterbildungen im Modelleinzugsgebiet Rindbach etabliert. Das Schutzwaldzentrum funktioniert als Koordinations- und Kommunikationspunkt zwischen allen internen und externen Projektpartnern. Bezogen auf Einrichtungen und Adaptionen des Schutzwaldzentrums erfährt das Projektteam maßgebliche Unterstützung von den Kolleg:innen der FAST sowie der WLV, welche einen reibungslosen Ablauf der Projektaktivitäten gewähren. Die Bereitstellung einer solchen Einrichtung wie das Schutzwaldzentrum ist gerade für die Installation eines Langzeitbeobachtungsgebietes ein nicht zu unterschätzender Faktor.

Das Projekt wird weiters von den Österreichischen Bundesforsten (ÖBf) unterstützt. Die ÖBf stellt dabei den Zugang und forstlich relevante Daten des Einzugsgebietes Rindbach zur Verfügung. Anfängliche Schwierigkeiten in der Koordination aller Projektbeteiligten und vor allem der Jagd-Pachtgesellschaft führte zur Einführung räumlich und zeitlicher Ruhezeiten im Einzugsgebiet sowie einer klaren Kommunikationsstrategie zwischen allen Beteiligten.

Diese Koordination wird projektintern laufend, und mit der ÖBf, der WLW und der Jagd-Pachtgesellschaft mindestens einmal jährlich evaluiert.

Grundlagenerhebung in den ersten drei Jahren.

Datenerhebung mit Beteiligung von zwei Forschungsorganisationen, sieben Instituten und insgesamt mehr als 20 Wissenschaftler:innen.

Im Zuge des MEZG-Rindbach Projektes, erhebt ein interdisziplinäres Konsortium bestehend aus Expert:innen der Universität für Bodenkultur (BOKU) und des Bundesforschungszentrum für Wald (BFW), in Zusammenarbeit und Abstimmung mit den ÖBf als Grundeigentümer und der WLV, umfassende Grundlagendaten zu den relevanten Naturgefahrenprozessen (u.a. Hochwasser, Rutschungen, Lawinen), dem Zustand und der Dynamik der Vegetation, den standörtlichen Bedingungen (Boden, Geomorphologie, Geologie, Hydrogeologie, Klima) und der Bewirtschaftung der (Schutz)Wälder.

Nachfolgend werden die bisherigen Aktivitäten der einzelnen Arbeitspakete (AP) vorgestellt.

AP 1: Projektmanagement

Christian Scheidl (IAN-BOKU), Michaela Teich (BFW)

Das Arbeitspaket umfasste die Verwaltung und Finanzkontrolle sowie eine umfassende und zeitnahe Berichterstattung, um den Projektfortschritt sicherzustellen, eine reibungslose Projektdurchführung zu ermöglichen und einen transparenten und schnellen Informationsfluss zu gewährleisten. Darüber hinaus umfasste es die Organisation von diversen Outreach-Aktivitäten, welche einerseits zur Verbreitung der Projektergebnisse an gesellschaftlich relevanten Interessensgruppen und andererseits in der wissenschaftlichen Gemeinschaft dienten. Diese Aktivitäten zielten darauf ab, einer breiten Öffentlichkeit wissenschaftliche Erkenntnisse und deren gesellschaftliche Relevanz zugänglich zu machen, um das Bewusstsein für die Bedeutung des Modelleinzugsgebiets Rindbach zu stärken. Gleichzeitig wurde durch gezielte Kommunikation und Präsentation der Forschungstätigkeiten innerhalb der

wissenschaftlichen Gemeinschaft das Potenzial des Rindbach-Gebiets als wertvolles Untersuchungsgebiet für zukünftige Forschungsprojekte hervorgehoben. So wurde nicht nur der Wissenstransfer gefördert, sondern auch die Attraktivität des Gebiets für interdisziplinäre Forschung unterstrichen.

Die wichtigsten Aktivitäten waren:

- 9. März 2023: „Come-Together MEZG Rindbach“. Schutzwaldzentrum im Waldcampus (Erläuterungen zu Fütterungen und Ruhezonen, Abgleich und Diskussionen mit geplanten Feldwochen, Wildeinflussmonitoring, Projektfortschritt (Vorschläge, Probleme,), Bericht von der Steuerungsgruppensitzung, Weiterführung Modelleinzugsgebiet Rindbach, Personelle Änderungen der Gesamtkoordination Schutzwaldzentrum, Bundesschutzwaldplattform Ausblick.
- 10. März 2023: „Schutzwald im Winter“. Traunkirchen/Ebensee.
- 28. Februar 2024: Internes Rindbachprojekttreffen (BOKU University)
- 29. Februar 2024: Fachaustausch Schutzwaldforschung in Österreich (BOKU-University). Was sind wichtige mittelfristige Schutzwald-Forschungsziele? Was kann der Rindbach für deine/eure Institution bieten? Welche anderen (wissenschaftlichen oder angewandten) Fragen/Probleme können wir im Rindbach untersuchen/beantworten? → Siehe Mindmap Abbildung 187 im Anhang.
- 24. Mai 2024: Lange Nacht der Forschung, Wien. Vorstellung MEZG-Rindbach → Poster im Anhang (Abbildung 188).

AP 2: Datenmanagement

Christian Scheidl (IAN-BOKU)

Im Rahmen des Projekts wurde ein umfassendes Datenmanagementsystem implementiert, das auf der Plattform Zenodo basiert. Zenodo ist ein Open-Access-Datenrepositorium, das von der Europäischen Organisation für Kernforschung (CERN) entwickelt und gehostet wird. Es wurde im Rahmen des OpenAIRE-Programms der Europäischen Kommission ins Leben gerufen, um Forschenden eine einfache und nachhaltige Möglichkeit zur Speicherung, Organisation und Veröffentlichung von Forschungsdaten zu bieten. Die Plattform unterstützt eine Vielzahl von Datentypen, darunter numerische Datensätze, Publikationen, Software und Multimedia-Inhalte, und ermöglicht es, diese mit standardisierten Metadaten zu versehen.

Für die Community „Model Catchment Rindbach“ wurde ein dedizierter Bereich auf Zenodo eingerichtet, in dem alle im Projekt gesammelten und erhobenen Daten zentral abgelegt werden:

zenodo.org/communities/mezg-rindbach

Dies gewährleistet nicht nur die Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Forschungsergebnisse, sondern auch deren langfristige Verfügbarkeit. Zenodo vergibt für jede hochgeladene Datei einen Digital Object Identifier (DOI), der eine eindeutige und dauerhafte Referenzierung ermöglicht. Dies ist besonders wichtig für die Langzeitforschung, da es sicherstellt, dass die Daten auch Jahre nach Projektabschluss auffindbar und zitierbar bleiben.

Darüber hinaus bietet Zenodo eine offene und kollaborative Plattform, die es Forschenden weltweit ermöglicht, auf die Daten der Community „Model Catchment Rindbach“ zuzugreifen und diese für weiterführende wissenschaftliche Untersuchungen zu nutzen. Durch die Nutzung von Zenodo wird nicht nur der Open-Science-Gedanke gefördert, sondern auch die Grundlage für interdisziplinäre Kooperationen und die Wiederverwendbarkeit der Daten geschaffen.

AP 3: Geologie und Hydrogeologie

Wolfgang Straka, Christian Zangerl, Karin Wriessnig (IAG-BOKU)

Die wesentlichen Aufgaben in Arbeitspaket 3 sind eine geologische Kartierung und Interpretation des Einzugsgebietes, mit speziellem Fokus auf die hydrogeologische Charakterisierung der Gesteine und Grundwasserkörper sowie die Ausarbeitung der Geogefahrensituation abzüglich Lawine und Hochwasser. Die Arbeit startete mit der Sammlung relevanter Literatur und digitaler Grundlagen. Diese digitalen Daten wurden in eine GIS-Struktur integriert, auf deren Basis eine Abflusstypenkarte erstellt sowie ein Gerinnenetz berechnet und bearbeitet wurde. Im Rahmen der Geländearbeiten wurden Quellen und Gerinne kartiert, Wasserproben für hydro-physikalisch-chemische Analysen entnommen, Abflussmessungen durchgeführt sowie Verwitterungsdecken und Sedimentkörper beprobt. Die bekannte Gasselhöhle am Nordrand des Einzugsgebiets (Gasselkogel) liegt im Grundriss zum größten Teil nördlich außerhalb des Einzugsgebiets und könnte auch dorthin entwässern. Die Geohydrologie ist jedoch unbekannt und würde sich nur in einem größeren Projekt mit einem gut geplanten Markierungsversuch näher erschließen. Voraussagen in dieser Hinsicht wären rein spekulativ und die Höhle wird daher in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

Spezielle Literatur

Bei der Kartendarstellung der Geogefahren und Gerinnemorphologie wurde Bezug genommen auf: Kienholz H. & Krummenacher B. (1995). Symbolbaukasten zur Kartierung der Phänomene. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern, 1995.

Die Kartierung und Klassifizierung der Abflusstypen richtet sich nach den Ergebnissen des Projekts HYGENOT, Erweiterte Abflussbeiwertkarte für Nordtirol – Hydrogeologie, das durch das Institut für Angewandte Geologie der BOKU Wien im Auftrag der Wildbach in den Jahren von März 2017 bis Juli 2021 bearbeitet wurde, veröffentlicht in: Straka W., Strauhal T., Zangerl C., Pittracher M., Kohl B., Markart G., Sausgruber T., Stepanek L., Kammerlander J., Kals M. & Pittracher M. (2021).

HYGENOT – Großskalige hydrogeologische Charakterisierung von Wildbacheinzugsgebieten (Nordtirol). Wildbach- und Lawinenverbau, Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions- und Steinschlagschutz, 85 (188), 50 – 61. Verein der Diplomingenieure der Wildbach- und Lawinenverbauung Österreichs, Bregenz.

Die globale Kennlinie der stabilen Isopen-Verhältnisse im Niederschlag geht zurück auf: Dansgaard (1964). Stable isotopes in precipitation. Tellus, 16 (4), 411 – 537.

Die bekannte Gasselhöhle am Nordrand des Einzugsgebiets (Gasselkogel) ist beschrieben in: Mattes J. & Kuffner D. (Hrsg.) (2018). Höh(l)enluft und Wissensraum. Die Gassel-Tropfsteinhöhle im Salzkammergut zwischen Alltagskultur, Naturkunde und wissenschaftlicher Forschung. Oberösterreichisches Landesmuseum, Linz.

Erhebung bestehender digitaler Raumdaten

Die folgenden, für das Arbeitspaket grundlegenden, digitalen Raumdaten wurden zum größten Teil aus öffentlich zugänglichen Datenbeständen entnommen und in eine GIS-Struktur überführt:

- Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen: Administrative Grenzen (Gemeindegrenzen, Blattschnitte, als .shp-Vektordateien), und die Österreichische Karte 1:50.000 (ÖK50, .tif-Rasterdateien, bez. km50_mit_Relief_1430_0_202107).
- DORIS Webdatendienst des Landes Oberösterreich: Digitales Geländemodell (DGM, .tif-Rasterdateien, 0.5m-Raster, im Koordinatensystem Austria GK Central, EPSG:31255), Höhenschichtlinien, Seeuferlinien (.shp-Vektordateien), und Orthofoto (.jpg2-Szenen und zugehörige .j2w-Worldfiles im Blattschnitt der Digitalen Katastralmappe), Wasserbuch (Punktdaten des Wasser-Informationssystems), und Geologie (stratigraphische Grenzlinien, als attributierte .shp-Vektordaten, mit lithologischer Klassifikation).
- Ein DGM der Wildbach- und Lawinenverbauung aus 2021 (.tif-Rasterdateien, 0.5m- und 1.0m-Raster, im Koordinatensystem Austria GK Central, EPSG:31255) war dem Projekt im Vorfeld zur Verfügung gestellt worden. Auf besondere Nachfrage haben wir vom Land Oberösterreich darüber hinaus die digitalen Geländemodelle für alle drei ALS-Befliegungen 2012, 2019 und 2021 erhalten (bereits mosaiziert, im Koordinatensystem UTM zone 33M, EPSG:25833, qualitativ besser als die frei zugänglichen Szenen). Die Befliegungen aus 2012 und 2021 überdecken das westliche Zwei-Drittel des Gebiets und konnten zu einem Differenzmodell verarbeitet werden. Die Befliegung 2019 erfasst nur das östliche Drittel.
- Geosphere Austria: Geologische Karte 1:50.000, Blatt 66 Gmunden und Blatt 67 Grünau im Almtal (als .pdf), Massenbewegungen (attributierter Punktdatensatz der GEORIOS-Datenbank).

- INSPIRE Datenservice der Europäischen Union: Tektonische Lineamente (als .shp-Vektordatensatz).
- Umweltbundesamt: Niederschlags-Isotopendaten der ANIP-Datenbank, Messstellen Nr. IN40000035 (425 m.ü.A., Messreihe 1973–1983) und Nr. IN40000036 (1680 m.ü.A., Messreihe 2007–2013).
- Geofabrik GmbH Karlsruhe: OpenStreetMap (als .shp-Vektordateien, einzelne verwendet zur Kartengestaltung).

Als Arbeitsgrundlage wurden die Daten in eine Schichtung von (verschiedentlich vorverarbeiteten oder gefilterten) Bild- und Vektor-Layers organisiert, die in Tabelle 1 aufgelistet sind.

Tabelle 1 Erhobene Geodaten im Zuge des AP 3

AKRONYM	Geodaten-Inhalt
ADM	Administrative Daten (Grenzlinien, Blattnummern), zur Orientierung.
OSM	OpenStreetMap, Daten von Geofabrik (http://download.geofabrik.de), mit Legende (https://github.com/mkoenigb), zur gelegentlichen Gestaltung von Beispielkarten. Für Kartierungen ist oft der Landnutzungslayer recht nützlich, im EZG heben sich allerdings nur ein paar Almwiesen von der nahezu flächendeckenden Waldsignatur ab.
MASS	Schutzbauten und Geogefahren-Hinweise aus dem Ereigniskataster des Landes.
WAS	Quellen, Schwinden, Gerinnemorphologie, Gerinne (besser allgemein: Abflusslinien). Abflusslinien wurden zunächst in SAGA GIS berechnet (Preprocessing, Flow Accumulation, Channel Network) und anschließend editiert. Störend für die Berechnung sind v.a. Straßen, die quer über die Hänge verlaufen oder in Serpentin angelegt sind. Sie leiten den Routing-Algorithmus oft auf falsche Bahnen. Die notwendigen Korrekturen (in QGIS) können umfangreich sein, bestehen technisch jedoch aus Standardoperationen. Bei der anschließenden Kartierung der Quellen konnten diese ggf. exakt auf die Linien des Gerinnenetzes gesetzt werden. Die Quellen sind als „dauerhaft“, „temporär“ und „vermutet“ klassifiziert, hinzu kommen Versickerungsstellen. Diese Punkte dienen im Folgenden zur Auftrennung der Abflusslinien in „perennierend“, „temporär“ und „temporär ohne Gerinne“. In diese Layergruppe werden auch die Ergebnisse der hydrophysikalisch-chemischen Messungen eingetragen.
KARTIERUNG	Geogefahren (Felsbänder, Abrisskanten, Rutschungen, etc.) und Sedimentdecken. Die Art der Kartierung entspricht Erfahrungen des Instituts mit zwei Vorprojekten, HYGENOT (Abflusstypen-Kartierung von Nordtirol, 2017 bis 2021, Auftrag WLV) und das noch laufende Projekt „Zukunftsfähige Konzepte für eine Gefahrenhinweiskarte von Oberösterreich“ (seit 2021, Auftrag Land OÖ). Eine sehr nützliche Hilfe bei Einschätzung der (Art der) Aktivität von Rutschungen und bei der Kartierung von

AKRONYM	Geodaten-Inhalt
	Uferanbrüchen und instabilen Böschungen ist die rechnerische Differenz zwischen verschiedenen ALS-Befliegungen. Die Befliegungen 2012, 2019 und 2021 sind momentan leider nur für die westlichen zwei Drittel des EZG verfügbar.
HOE	Höhenschichtlinien, zur Orientierung und Kartengestaltung.
GEO	Die geologischen Karten (Blatt 66 Gmunden und 67 Grünau im Almtal) der GBA im .pdf-Format wurden georeferenziert, die Verwendung war rein informativ. Wir hatten bei der Kartierung keine Absicht, Grenzen zu übernehmen, und daher waren die an sich über INSPIRE verfügbaren Vektordaten weniger nützlich, weil sie nicht die Legende der GBA-Karten enthalten.
OEK50	Topografische Karte 1:50.000, .tif-Rasterdateien aus den öffentlich verfügbaren Daten des BEV. Verwendung informativ, keine Verarbeitungsschritte.
ORTHO	Orthofoto als Gruppe von .jp2-Rastern (und zugehörigen .j2w-Worldfiles) im Blattschnitt der Digitalen Katastralmappe aus dem Datenbestand von DORIS, sonst wie OEK50.
DGM_05m	Digitales Geländemodell (DGM) 0.5m-Raster: Virtueller Raster von .tif-Dateien aus dem öffentlichen Datenbestand von DORIS. Die durch DORIS übermittelten nicht-öffentlichen, einzelnen .tif-Rasterdateien der neueren ALS-Befliegungen 2019 und 2021, im Original-Koordinatensystem (UTM zone 33N, EPSG:25833, bereits mosaiziert, 0.5m-Raster, leider noch nicht im genzen EZG) haben eine deutlich bessere Qualität als die der öffentlich verfügbaren Daten, die im Detail unzählige kleine Datenfehler enthalten (kleine, unreale Senken und Erhebungen, wahrscheinlich durch Transformation ins Landessystem). Daraus abgeleitet wurden der Analytic Hillshade und die Topographic Openness. Letztere akzentuiert als Overlay gleichmäßig und ohne Schattenwirkungen Einschnitte und Senken.
DGM_Differenz	Differenz zwischen .tif-Rastern im UTM-System, wie unter "DGM_05m", der ALS-Befliegungen 2021 minus 2019 und 2021 minus 2012 (resampled auf 0.5m-Raster), mit SAGA im Original-Koordinatensystem (keine Interpolationen vor der Berechnung).

Feldaufnahmen und Laborarbeiten

Im Rahmen der Geländekampagne wurden umfangreiche hydrogeologische Untersuchungen sowie Quellen- und Gerinnekartierungen durchgeführt.

Quellkartierung

Zwischen dem 18. Juli 2022 und dem 5. August 2022 konnten mithilfe des digitalen Geländemodells (DGM) insgesamt über 450 Quellen lokalisiert werden, darunter 76 dauerhafte, 237 episodische, 138 vermutete Quellen (ohne Quellschneise oder Wasserbeobachtung) sowie 3 Karstquellen. Zusätzlich wurden 3 alte Quellschneisen, 20 Versickerungsstellen und 18 Dolinen dokumentiert. Im Einzugsgebiet des Rindbachs wurden 73 Zubringer identifiziert,

wobei der Lochbach mit seinen 11 eigenen Zubringern der größte ist. An 89 Stellen, darunter 53 Quellen, wurde die elektrische Leitfähigkeit gemessen, wofür ein eigenes WTW-Gerät zum Einsatz kam. Aus diesen Messungen wurden 26 Proben (davon 23 Quellen) für eine weiterführende hydrochemische Analyse ausgewählt.

Wasserprobennahmen

Die Wasserprobennahmen zur hydrophysikalisch-chemischen Analyse erfolgten in drei Kampagnen: vom 10. bis 15. Mai 2023, vom 24. bis 28. Juli 2023 und vom 22. bis 29. September 2023. Während der letzten Kampagne wurden zusätzlich 8 Quellen beprobt, um die stabilen Wasserisotope (Sauerstoff-18 und Deuterium) sowie Tritium zu analysieren. Ergänzend dazu wurden zwischen dem 27. Oktober und dem 2. November 2023 Lockergesteinsproben aus Verwitterungsdecken und Sedimentkörpern entnommen. Insgesamt wurden 15 Kübelproben à 12 Liter gesammelt.

Quellabflussmessungen

Die Abflussmessungen fanden in vier Kampagnen statt: vom 10. bis 12. April 2024 (Testmessungen und Auswahl der Messstellen), vom 4. bis 8. Juni 2024, vom 24. bis 25. Juli 2024 sowie vom 4. bis 5. November 2024. Die Messungen im Juni und Juli 2024 erfolgten kurz nach stürmischen Gewittern, wobei aus Sicherheitsgründen nicht alle Messstellen angefahren werden konnten. Während der schweren Unwetter im September 2024 wurden keine Messungen durchgeführt. Die Abflussmessungen wurden in der Regel als Kübelmessungen durchgeführt, in Einzelfällen kam jedoch die Salzverdünnungsmethode zum Einsatz. Aus Rücksicht auf jagdliche Interessen wurde der südwestliche Teil des Einzugsgebiets um den Eibenberg von den Untersuchungen ausgenommen.

Laborarbeiten

Die analytische Auswertung der Wasser- und Sedimentproben erfolgte in spezialisierten Laboren. Die hydrochemischen Analysen wurden im chemischen Labor des Instituts für Waldökologie der BOKU Wien unter der Leitung von Herrn Marcel Hirsch durchgeführt. Die Untersuchung der stabilen Wasserisotope übernahm Frau DI Martina Faulhammer im Isotopenlabor des Instituts für Bodenphysik und landeskulturelle Wasserwirtschaft der BOKU Wien unter der Leitung von Frau Univ.Prof. Dr. Christine Stumpp. Die Tritium-Konzentrationen wurden im Isotopenlabor der AGH Wissenschaftlich-Technischen Universität Kraków, Fakultät für Physik und Angewandte Computerwissenschaften, unter der Leitung von Herrn

Dr. Przemyslaw Wachniew, analysiert. Die Korngrößenverteilung der Sedimentproben sowie die Gesamtmineralogie der Feinfraktion ($< 20 \mu\text{m}$) und die Tonmineralogie ($< 2 \mu\text{m}$) wurden im Tonminerallabor des Instituts für Angewandte Geologie der BOKU Wien durch Frau DI Maria Mayrhofer untersucht. Quelltypen und erste Erkenntnisse

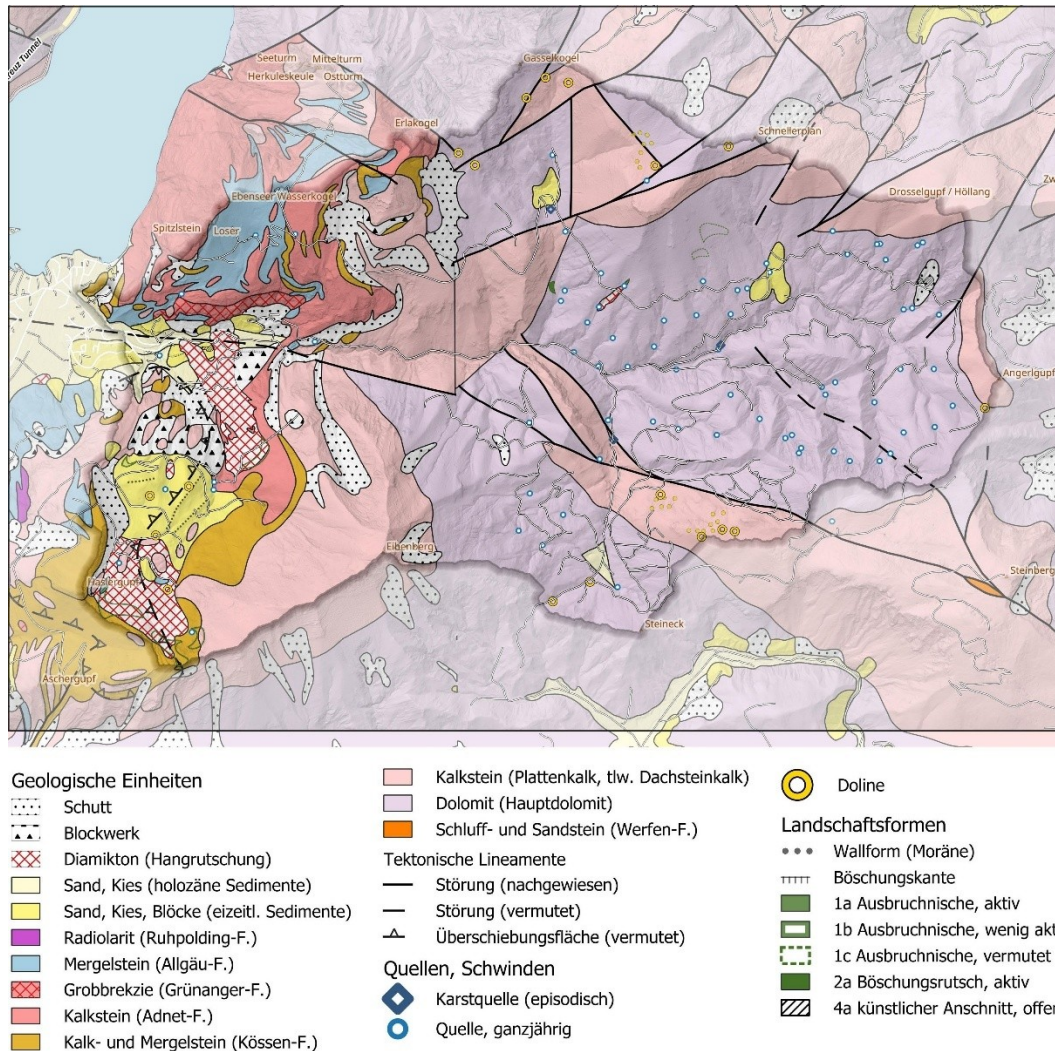
Datenauswertung

Im Folgenden werden bisherige Schlussfolgerungen beispielhaft durch einige Abbildungen illustriert und kommentiert.

Geologie

Abbildung 4 gibt die lithologische Gliederung des Einzugsgebiets (EZG) wieder, abgeleitet aus der veröffentlichten geologischen Karte der Geosphere Austria (Blatt 66 Gmunden und Blatt 67 Grünau im Almtal). Das Rindbach-EZG ist hervorgehoben. Die lithologischen Einheiten sind in stratigraphischer Reihenfolge, und die Formationen (bez. „F.“) dazu in Klammern, aufgeführt. In Abweichung von der publizierten Karte wird am Nordwestfuß des Eibenbergs nicht ein großer Schwemmkegel, sondern eine Rutschung zwischen einem kleineren Schwemmkegel und einer Blockschuttmasse ausgedehnt.

Abbildung 4 Lithologische Gliederung des Rindbach Einzugsgebiets



Das westliche Drittel des EZG ist dominiert von Gesteinen der Obertrias (Dachsteinkalk, Kössen-Formation) sowie des Unterjura (Adneter Kalk, eigenartig fleischfarben und brekziös, Grünanger-Formation, Allgäu-Formation). Schon im Kartenbild ist eine komplizierte Verfallung (duktile Verformung) der Gesteinskomplexe erkennbar. Im ganzen übrigen EZG gibt es nur zwei Formationen der Obertrias, Hauptdolomit und Plattenkalk. Den Plattenkalk kann man als Übergangsfazies zwischen Hauptdolomit und Dachsteinkalk verstehen. Er wird manchmal als Verzahnung zwischen beiden beschrieben (ein Beispiel im EZG, im Graben bei Quelle Nr. 17, Abbildung 12), im Gelände typischer sind aber Übergänge im Grad der Dolomitisierung (gut aufgeschlossen zum Beispiel im Haupttal knapp westlich des Karbortalgrabens).

Das ganze Gebiet wird tektonisch der Staufen-Höllengebirgsdecke zugerechnet. In der älteren Literatur wird die Grundstruktur im Nord-Süd-Schnitt gerne als Antiklinale (Fortsetzung

der Höllegebirgsantiklinale) gezeichnet. Dies steht im Widerspruch zu den in der publizierten Karte (vor allem Blatt 67) zahlreich eingetragenen Fallzeichen. Generell herrscht ein sehr verschieden steiles N- bis NW-Einfallen. Die Schichten fallen im Süden steiler als die meisten Hänge, im Norden flacher, aber in den Hang hinein, also in jedem Fall geotechnisch günstig. Daher sind auch die Hänge im Allgemeinen stabil. Instabil sind eher einige Sediment- oder mächtige Verwitterungsdecken.

Besonders im Ostteil des EZG sieht man zahlreiche tektonische Keile aus Hauptdolomit und/oder Plattenkalk miteinander verzahnt. Die begrenzenden Störungen stehen alle sehr steil (ziemlich gerade Verläufe unabhängig von der Morphologie), und wurden aus Kartierkriterien abgeleitet, während man sie im Gelände direkt nur schlecht beobachten kann, am ehesten als breite Zonen mit hohem Zerlegungsgrad. Jedenfalls im Dolomit sind diese Störungen zumeist keine hydrogeologischen Barrieren. Der Plattenkalk ist verkarstet (Tennalm, oberer Karbentalgraben mit der bekannten Gasselhöhle, Steinberg im SE) aber auch im Dolomit gibt es Schwinden (Sattel zwischen Erlakogel und Gasselkogel, Fahrnau) und Karstquellen (drei in der Karte eingezeichnet, eine im Haupttal ohne sichtbare Beziehung zu einem Kalkstock).

Es sind nur wenige mächtige (eiszeitliche und holozäne) Sedimentkörper vorhanden, vor allem die hochglazialen Seitenmoränen und die spätglazialen bis holozänen Rutschmassen und Blockschuttkörper am Nordabhang des Eibenberges. Geringermächtige Lockergesteinsdecken sind in der nachfolgend beschriebenen Abflusstypenkartierung genauer berücksichtigt. Die erhalten gebliebenen glazigenen Sedimente reichen leider nicht aus, um Vorstoß und Rückzug des Traungletschers und etwaiger kleiner Lokalgletscher im Tal zu rekonstruieren.

Abbildung 5 und Abbildung 6 geben den Geländeaspekt einiger wichtiger Gesteinseinheiten sowie des Karstplateaus der Tennalm wieder.

Abbildung 5 Typische Gesteinseinheiten des Einzugsgebietes



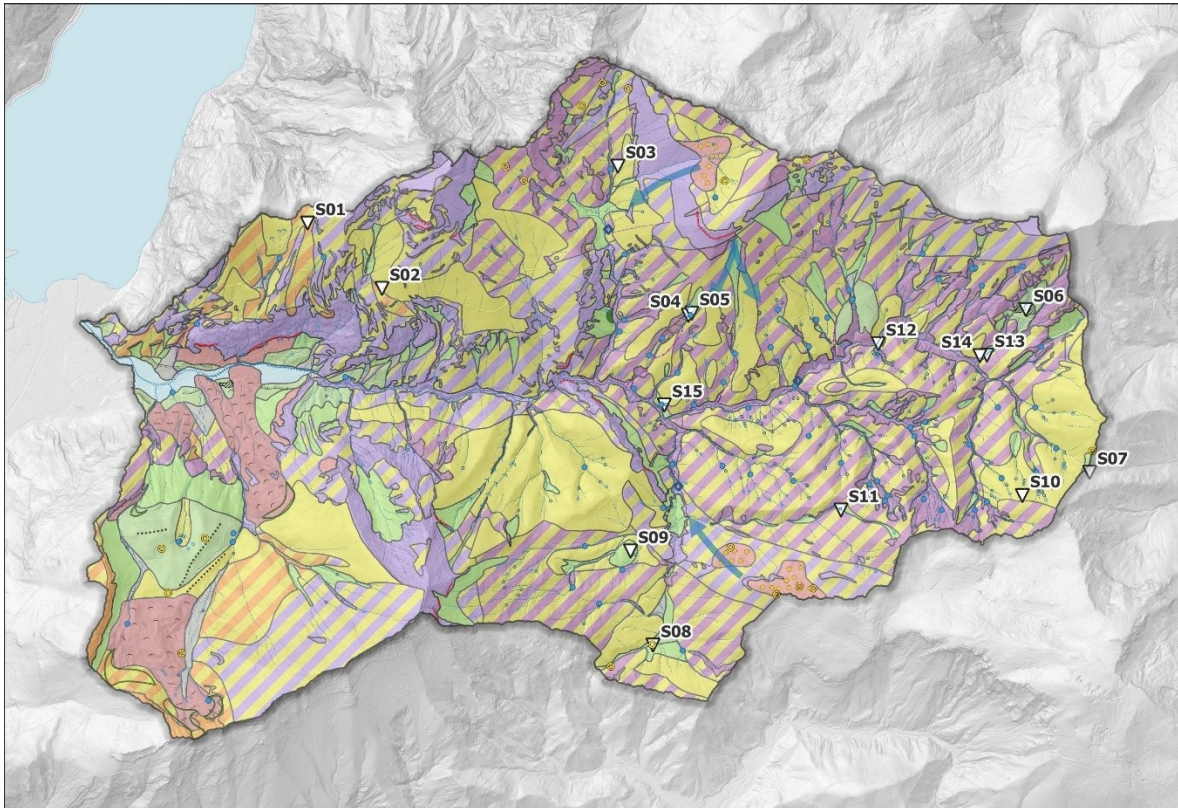
Abbildung 6 Gesteinseinheiten, geomorphologische Ausprägungen und Geländeaspekt des Karstplateaus der Tennalm (letztes Foto)



Abflusstypen aus geologisch-geomorphologischer Ansprache

Abbildung 7 zeigt das Ergebnis der Abflusstypenkartierung. Die nummerierten Dreiecke bezeichnen die Herkunftsstellen der Sedimentproben. Bei den sog. Abflusstypen nach HYGE-NOT (siehe obige Literaturhinweise) handelt es sich um eine Klassifizierung der Erdoberfläche hinsichtlich deren Verhaltens bei Starkregen, die zu Hochwasser führen. Es geht weniger um die hydrogeologisch zumeist untersuchten tieferen Gesteinskomplexe und langzeitigen Fließsysteme, sondern um die Möglichkeit der Versickerung großer Regenmengen in mehr oder weniger retentionsfähige, poröse Locker- und Festgesteine, die an der Oberfläche anstehen. Zum Beispiel wird auf geklüfteten, aber nicht ausreichend porösen Festgesteinen im Hochwasserfall der Oberflächenabfluss dominieren, obwohl im tieferen Untergrund auch ein Fließsystem mit längeren Verweilzeiten angespeist wird; in mächtigen Verwitterungsdecken dominiert dagegen häufig der Zwischenabfluss, usw.

Abbildung 7 Abflusstypen



Gerinnenetz

Quelle, Schwinde

- k - Karstquelle (episodisch)
- q - Quelle
- e - episodische Quelle
- o - vermutete Quelle
- v - Versickerungsstelle
- a - Alte Quellnische
- d - Doline, Toteisloch

Gerinnemorphologie

- p - Gerinne, perennierend, mit Murgang
- t - Gerinne, temporär, mit Murgang
- e - Tiefenerosion
- a - Ausbruchsweg, potentiell
- aa - Ausbruchsweg, erwiesen
- u - Umlagerungsstrecke

Gerinne

- p - perennierend
- t - temporär
- o - temporär, ohne Gerinne
- v - Versickerungsstrecke
- u - unterirdischer Abfluss
- Vernaessung

Kartierung

- Sedimentproben

Geländekante, Wallform

- w - Wallform (Moräne)
- b - Böschungs-OK

Felsband, Sturzbahn

- 1a Ablösestellen aus Felsbändern, aktiv
- 1b Ablösestellen aus Felsbändern, wenig aktiv

Nischenformen, Anschnitte

- 1a Ausbruchsnische, aktiv
- 1b Ausbruchsnische, wenig aktiv
- 1c Ausbruchsnische, vermutet
- 2a Böschungsrutsch, aktiv
- 4a künstlicher Anschnitt, offen

Rutschung - Tiefgang

- m - mittelgründig
- f - flachgründig

Abflusstypen

- 12 tiefgründig, hoher Rückhalt (Felsauflockerung, Rutschmassen)
- 13 tiefgründig, geringer Rückhalt (Karst, hohlraumreiche Ablagerungen)
- 41 Oberflächenabfluss, hoher Rückhalt (Karbonate, meist Dolomit)
- 42 Oberflächenabfluss, geringer Rückhalt (Karbonate, verkarstungsfähig)
- 45 Oberflächenabfluss, variabler Rückhalt (tonig-mergelige Sedimentgesteine)
- 21 Zwischenabfluss, hoher Rückhalt (Sedimentkörper, mächtig)
- 22 Zwischenabfluss, geringer Rückhalt (Sedimentkörper, geringmächtig)
- 23 Zwischenabfluss, variabler Rückhalt (Schwemmkegel, Murschuttkegel)
- 30 Oberflächen-/Zwischenabfluss, geringer Rückhalt (mächtige Bodendecke)
- 31 Zwischenabfluss, geringer Rückhalt (Verwitterungsdecke auf Dolomit)
- 32 Zwischenabfluss, geringer Rückhalt (Verwitterungsdecke auf Kalkstein)
- 35 Oberflächen-/Zwischenabfluss (Verwitterungsdecke auf Ton-/Mergelstein)
- 60 Talböden, variabler Rückhalt

Die Bedeutung der kartierten Abflusstypen ist in der Legende zu Abbildung 7 für unsere Zwecke ausreichend angegeben. Im Unterschied zu der großmaßstäbigen Kartierung im HYGENOT-Projekt wurden für diese kleinmaßstäbige Kartierung drei Übergangstypen eingeführt (Nr. 31, 32 35). Fachlich ist dies dadurch gerechtfertigt, dass in großen Teilen des Untersuchungsgebiets oberflächliche Felszerlegungszonen in örtlich wechselnder Mächtigkeit, aber durchgehend mit nur geringer Humusdecke, vorhanden sind. Die Kartierung nimmt auch auf geringmächtige Lockergesteinsdecken Rücksicht, die keinen Platz auf einer publizierten geologischen Karte haben.

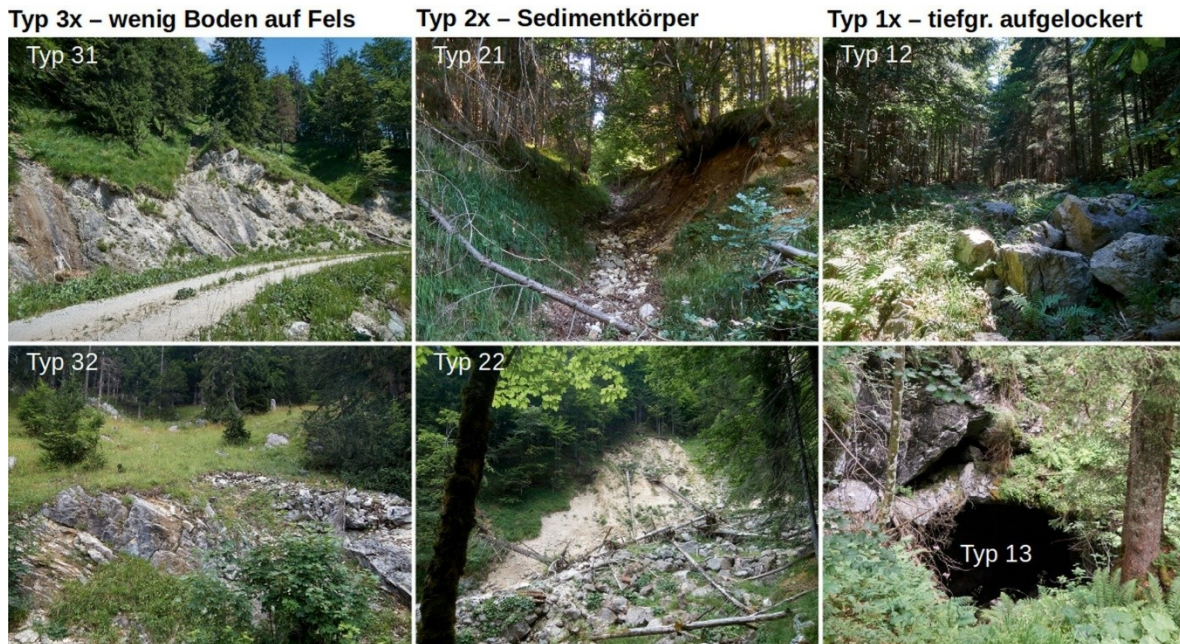
Abbildung 8 und Abbildung 9 illustrieren den Eindruck, den einige häufige Abflusstypen im Gelände machen.

Abbildung 8 Abflusstyp – dominierend Zwischenabfluss, sehr geringer Rückhalt

Typ 30 – Dominierend Zwischenabfluss, sehr geringer Rückhalt



Abbildung 9 Beispiele Abflusstypen im Einzugsgebiet



Sedimentologie der Deckschichten

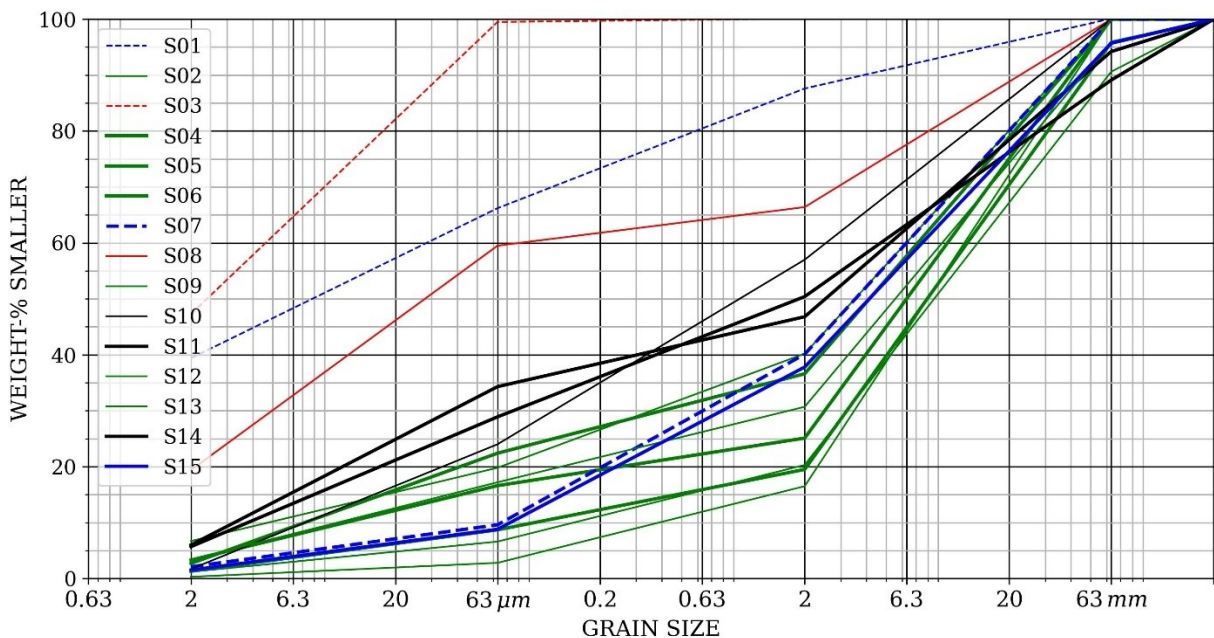
Abbildung 10 und Abbildung 11 zeigen die Korngrößenverteilung (Kornsummenkurven) bzw. die Gesamtmineralogie der Feinfraktion ($< 20 \mu\text{m}$) der 15 Sedimentproben (Probenahmestellen siehe Abbildung 7). Die Mineralgehalte wurden semiquantitativ erfasst und werden grafisch durch Balkenlängen in 10 Stufen von 0– „nicht nachweisbar“ bis 9– „hoher Gehalt“ repräsentiert.

Hervorzuheben sind zunächst die obersten drei Summenkurven. S03 ist ein Schluff-Ton auf Dolomit, jedoch weitgehend karbonatfrei, der auch als Karstspaltenfüllung auftritt. S01 ist eine Verwitterungsdecke auf Mergelstein (steiniger Schluff-Ton auf Allgäuschichten, völlig karbonatfrei) mit Schutteinstreu. S08 wurde aus der Doline auf der Fahrnau entnommen und zeigt eine bimodale Korngrößenverteilung (Kies-Schluff-Ton Gemisch mit weitgehend fehlender Sandfraktion).

S10 ist eine Boden-Felsübergangszone über stark zerbrochenem Hauptdolomit. Ältere Talfüllungen S11 und S14, mit noch nicht ausgewaschenem Feinanteil, könnten von solchen Deckschichten abgeleitet sein. Die weiteren Summenkurven repräsentieren verschiedene Schuttkörper (schluffiger bis stark schluffiger Kies, teilweise steinig, Blöcke wurden aussortiert). S04 und S05 stammen aus der Rutschung an der Zufahrt zum Karbertalgraben, S06

aus der sog. Sandgrube, S07 und S15 enthalten vermutlich Reste glazialer Vorstoß- und Moränensedimente, aber alle diese weichen nicht wesentlich von den verbreiteten Schuttablagerungen ab. Auffallend im Gelände war jedoch die hohe Porosität der abgerutschten Deckschicht (S04, S05).

Abbildung 10 Korngrößenverteilung der erhobenen Sedimentproben (Probenahmestellen siehe Abbildung 7)



Auffällig in Abbildung 11 ist der Gehalt an Mineralen aus kristallinen Gesteinen (Quarz, Feldspäte, Amphibole), die, vielleicht mit Ausnahme einiger klastischer Sedimente, nicht aus dem anstehenden Gestein stammen können, sondern ferntransportiert worden sein müssen, durch Eis oder Wind (ohne mikroskopische Untersuchung nicht zu unterscheiden). Die Tonfraktion ($< 2 \mu\text{m}$, Tonmineralogie nicht abgebildet) enthält im Wesentlichen Illit, Kaolinit (oft schlecht kristallisiert) und untergeordnet Chlorit, teils auch Vermikulit (bes. S08 aus der Fahrnau), und Smektit (bes. S01 über den Allgäuschichten).

Abbildung 11 Gesamtmineralogie der Feinfraktion (< 20 µm) der 15 Sedimentproben
(Probenahmestellen siehe Abbildung 7)

Bez.	Qu	Kf	Plag	Cc	Dol	14A	Glim	Amph	7A	Goeth	Schicht.
S01	■	■	■	■	■	■	■	■	■	?	■
S02	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
S03	■	■	■	■	■	■	■	■	■	?	■
S04	■	■	■	■	■	■	■	■	■	?	■
S05	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
S06	■	■	■	■	■	■	■	■	■	?	■
S07	■	■	■	■	■	■	■	■	■	?	■
S08	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
S09	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
S10	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
S11	■	■	■	■	■	■	■	■	■	?	■
S12	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
S13	■	■	■	■	■	■	■	■	■	?	■
S14	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
S15	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Geofahren, Massenbewegungen

Wie erwähnt, sind aufgrund des günstigen Schichteinfallens relativ zur Böschung die Hänge im Allgemeinen stabil. Im DGM-Differenzmodell (Befliegungen 2021 minus 2012) sind die Schuttrutschung am Südabhang der Tennalm (Sedimentproben S04, S05) zufolge des Hochwassers 2013, und ansonsten nur lokal an Felsbändern und in Schuttschürzen darunter, jedoch keine großräumigeren, Veränderungen der Geländeoberfläche erkennbar.

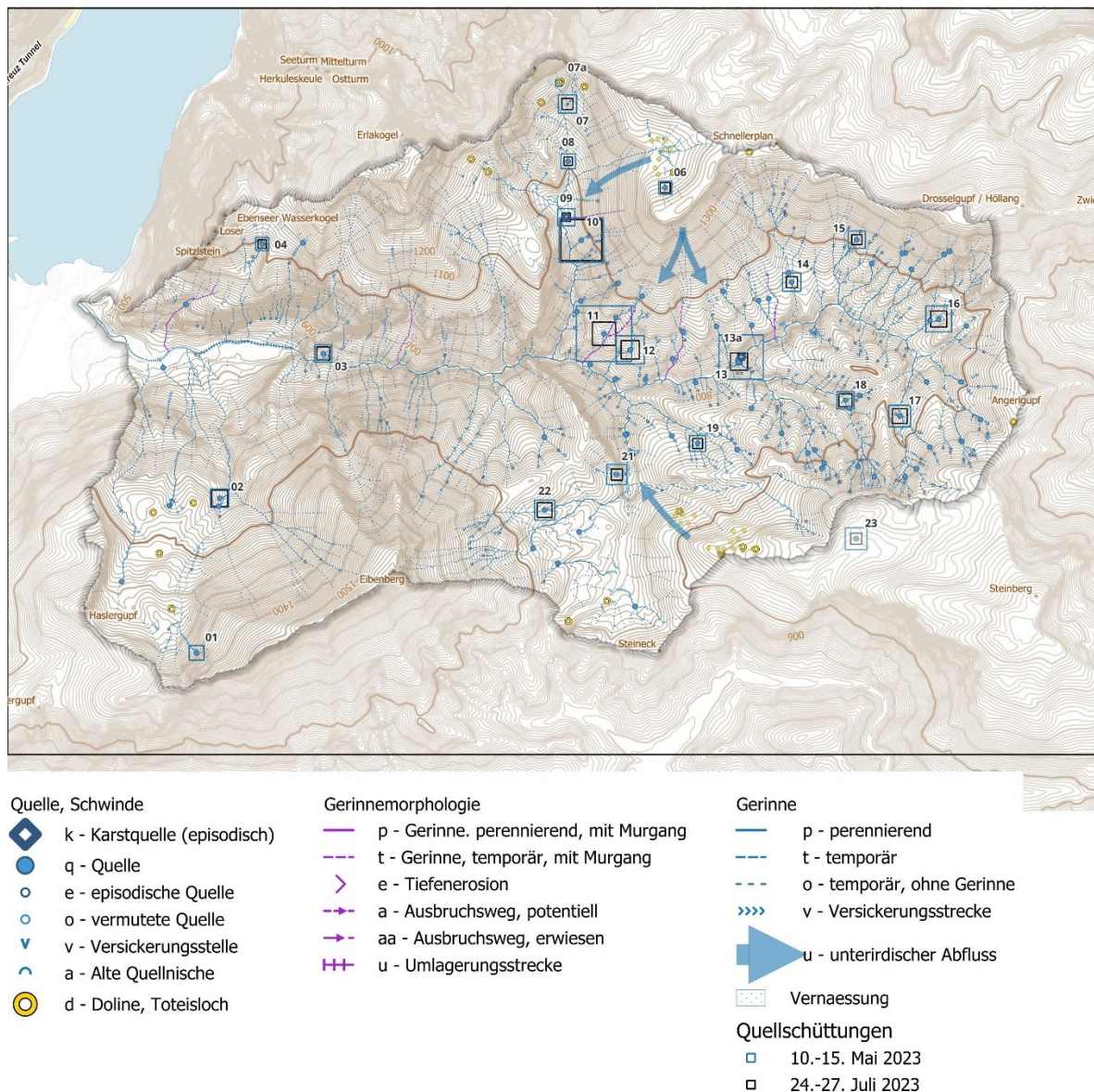
Durch die erwähnte Schuttrutschung ist erwiesen, dass mächtigere Deckschichten aus Schutt und Verwitterungsgrus instabil werden können. Die abgerutschte Deckschicht besteht zum Großteil aus kantigen, gut verzahnten Bruchstücken im cm-Maßstab, ist sehr porös, und an der Basis tritt Wasser aus dem Hang aus. Dadurch und aufgrund der guten Durchlässigkeit kann sich bei Starkregen an der Basis viel Wasser ansammeln und den Reibungswiderstand schwächen. Dem steht die gute Verzahnung entgegen, die jedoch unter Umständen plötzlich versagen kann.

Vergleichbare Schuttkörper, und vermutliche Ausbruchsnischen früherer Schuttrutschungen, finden sich am östlich anschließenden Hang (südöstlich der Tennalm). Dort wäre es auch möglich, dass, ähnlich der bestehenden Rutschung, durch eine Mure seitlich an der Rutschmasse vorbei, eine Ausbruchsstrecke gebildet wird (bestehender und potenzieller Ausbruchsweg in der folgenden Abbildung 12 eingetragen).

Gerinnenetz, Quellen und Schwinden

Abbildung 12 zeigt das Gerinnenetz und ca. 450 Quellen, von denen nur etwa jede Zehnte dauerhaft schüttet. Angedeutet sind auch Abflusslinien ohne Gerinne, die nur bei Starkregen aktiviert werden. Die zur wiederholten Beprobung ausgewählten Quellen und Quellgerinne (Nr. 12, 15) sind nummeriert. Fehlende Nummern beziehen sich auf einen Graben (Nr. 05) und die Karstquelle im Lochbach (Nr. 20), die zumeist trocken sind und daher nicht zur richtigen Zeit beprobt werden konnten. Die dicken blauen Pfeile deuten vermutete, durch Karsthohlräume bedingte Abflussrichtungen im tieferen Untergrund an. Vermutete Infiltrationsgebiete dazu sind die kleinen Karstplateaus (Dolinenfelder) auf der Tennalm im Norden und der Steinalm im Süden.

Abbildung 12 Übersicht des Gerinnenetzes und der ca. 450 Quellen



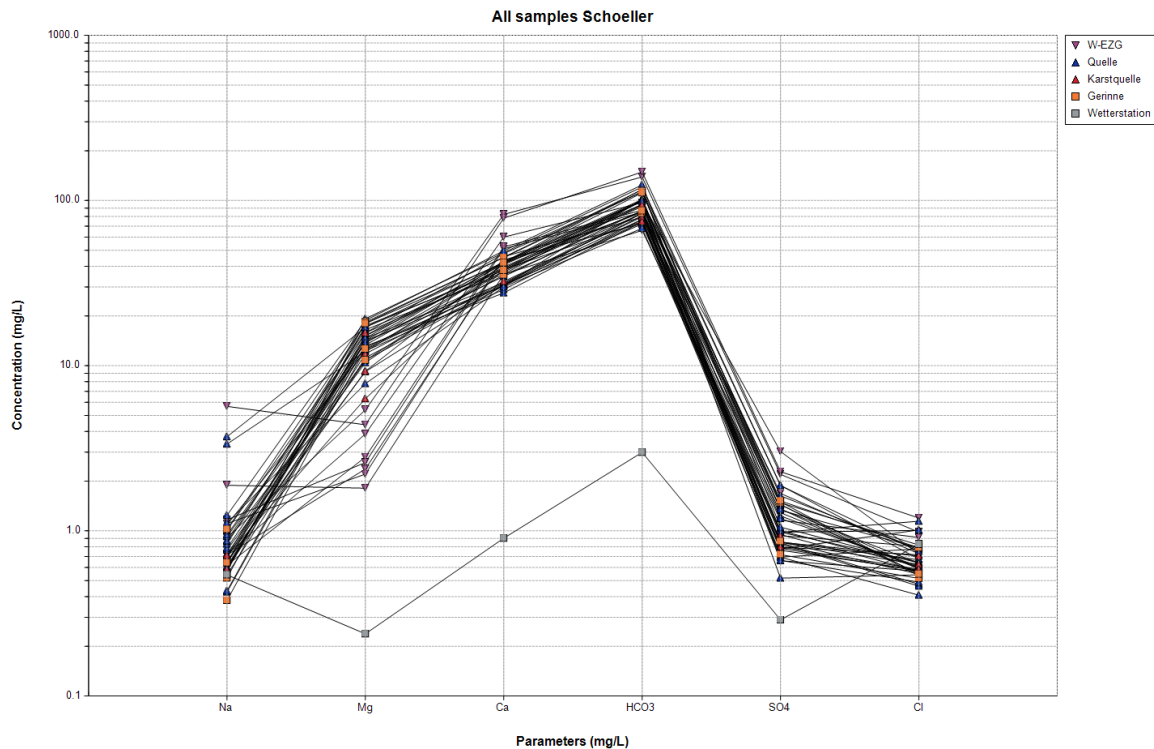
Die Quadrate um die Messpunkte sind flächenproportional zur Quadratwurzel der Quellschüttung im Mai 2023 (nach der Schneeschmelze) bzw. Juli 2023 bei „normalen“ Witterungsbedingungen (nicht zu trocken, die Karstquelle Nr. 09 hatte auch im Juli eine, wiewohl kaum messbare, Schüttung). Der größte Wert bei Nr. 11 betrug 50 l/s. Die beiden Messreihen vermitteln vergleichsweise einen Eindruck der Schwankungsbreite der Schüttung (Schüttungskoeffizient) der gemessenen Quellen. Kein realistisches Bild ergibt sich dabei natürlich für die nur sehr kurzzeitig anspringenden Karstquellen Nr. 09 und 20 (letztere fehlt hier, weil trocken).

Im Zuge der Kartierung im Sommer 2022 wurden, im Hinblick auf die Auswahl der oben beschriebenen Messstellen, an 89 Stellen die Wassertemperatur, die elektrische Leitfähigkeit (LF) und das pH gemessen. LF lag im Wertebereich zwischen ca. 180 und 415 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Der höchste Wert war am Aloisibründl (Nr. 04, aus Deckschichten über Mergelstein, mit niedriger, aber konstanter Schüttung), und regional erhöhte Werte um den Südfuß der Tennalm zu beobachten (Quelle Nr. 12 wurde deshalb in die Auswahl genommen), während im hinteren EZG geringe Werte vorherrschen (geringe Sickertiefe und kurze Verweilzeit). Es gibt einen gewissen räumlichen Trend zu höheren LF-Werten in tieferen Lagen, und erwartungsgemäß war LF im Juli einige 10 $\mu\text{S}/\text{cm}$ höher als im Mai. Ansonsten sind keine klaren Muster auszumachen. Das pH lag zwischen 7.7 und 8.6 und somit in einem für diese Geologie typischen Wertebereich (ein Wert von pH 10 bei Nr. 07 im Mai 2023 könnte eine Fehlmessung sein). Die saisonalen Temperaturschwankungen waren dagegen sehr aussagekräftig und werden später besprochen. Vorausschickend bemerken wir, dass sich die Quellen Nr. 01 und 02 westlich des Eibenbergs durch eine konstant niedrige Temperatur, und viele Quellen im hinteren EZG durch starke saisonale Differenzen auszeichnen.

Hydrochemie

Abbildung 13 zeigt das Schoeller-Diagramm der Hauptionen (in mg/l). Dargestellt sind alle Datensätze; die Charakteristiken aus beiden Messkampagnen (Mitte Mai und Ende Juli 2023) unterscheiden sich nicht grundlegend. Die stark abweichende Kennlinie kommt aus dem Ombrometer der Wetterstation bei der sog. Sandgrube (Sediment-Probenahmepunkt Nr. 06), Daten vom Juli 2023, die zu dem Zeitpunkt noch mit Frostschutz beaufschlagt war.

Abbildung 13 Schoeller-Diagramm der Hauptionen (in mg/l)



Man kann offenbar zwei Wassertypen unterscheiden, Typ Ca-HCO₃ im Westteil des EZG (Messstellen 01 bis 04, violette Dreiecke, bez. W-EZG) und Typ Ca-Mg-HCO₃ im restlichen, lithologisch vom Hauptdolomit dominierten EZG, die wir der Einfachheit halber als „Kalkgruppe“ und „Dolomitgruppe“ bezeichnen wollen. Die temporäre Karstquelle Nr. 09 scheint eine Zwischenstellung zwischen Kalk- und Dolomitgruppe einzunehmen, die Dolomitkarstquelle Nr. 13a fügt sich aber gut in den Rest der Dolomitgruppe ein.

Innerhalb beider Gruppen gibt es wesentliche Unterschiede in der elektrischen Leitfähigkeit (LF). In der Kalkgruppe haben Nr. 01 hoch am westlichen Eibenberg die geringste, und Nr. 04 (Aloisbründl) die höchste LF im EZG, die Dolomitkarstquelle Nr. 13a hat eine deutlich höhere LF als die benachbarte dauerhafte Quelle Nr. 13.

Eine positive Anomalie bei Natrium (Na) und Chlorid (Cl) tritt in den höchstgelegenen Quellen Nr. 01 und 04 der Kalkgruppe auf (im Frühjahr, nicht im Sommer). Auch die Quellen Nr. 06 auf der Tennalm und Nr. 23 bei der Steinbergstube, die auf verkarsteten Plateaus liegen (aber keine Karstquellen sind), zeigen eine positive Na-Anomalie (im Sommer, nicht im Frühjahr). Cl verhält sich nicht gleichsinnig mit Na. In Quelle Nr. 06 ist es im Sommer relativ niedrig, im Gegensatz dazu, was man bei einem so oberflächennahen, exponierten Aquifer

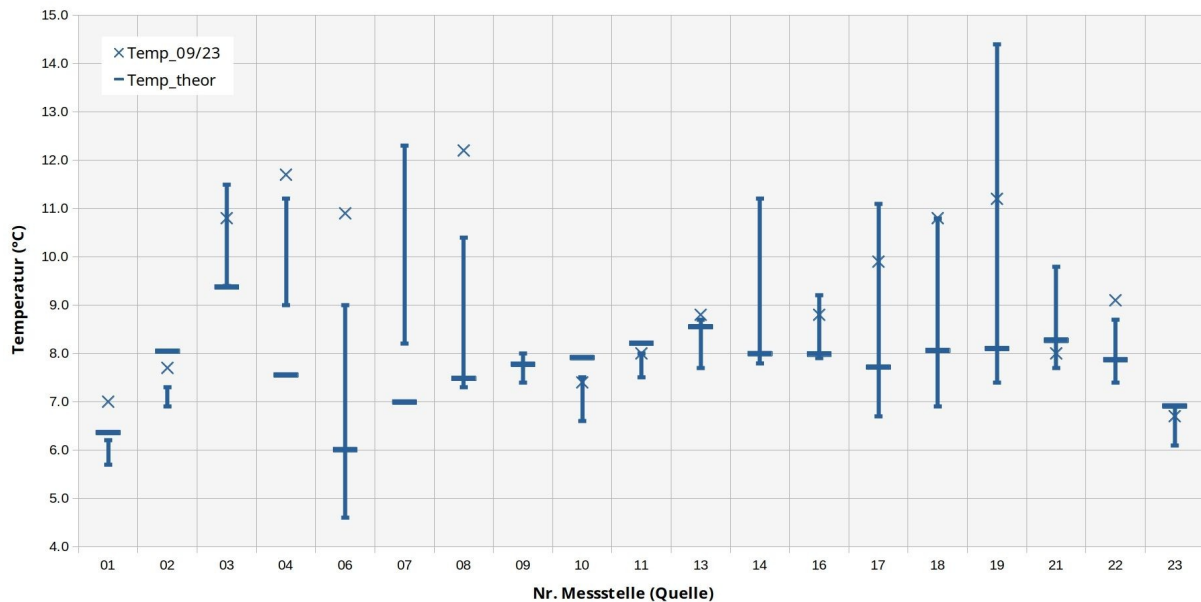
erwarten würde (Verdunstung). Die weiter unten beschriebene Isotopie macht das verständlicher (Neubildung des oberflächennahen Grundwassers in der kalten Jahreszeit).

Einige Quellen, darunter auch die Dolomitkarstquelle Nr. 13a, hatten kurz nach der Schneeschmelze (Mai 2023) einen nachweisbaren Gehalt an Nitrit (NO₂) und/oder Phosphat (PO₄). In den Sommerproben war Nitrit nicht mehr nachweisbar. Nitrat (NO₃) ist generell unauffällig, am höchsten (ca. 5–6 mg/l) bei Quelle Nr. 03, die an einem viel begangenen Wanderweg liegt.

Quellwasser-Temperatur

Abbildung 14 veranschaulicht die jährlichen Wasser-Temperaturschwankungen der ausgewählten Quellen (Balken: Mai/Juli 2023, Kreuze: September 2023), und vergleicht sie mit der Jahresmitteltemperatur der Luft in der Höhe des jeweiligen Quellaustritts (Querbalken, die durchschnittliche Infiltrationstemperatur wird im Allgemeinen darunter liegen). Hohe Temperaturschwankungen sind im hinteren Teil, besonders im Südosten des EZG (Nr. 14, 16, 17, 18, 19) zu beobachten, durchgehend oberhalb der vermutlichen, durchschnittlichen Infiltrationstemperatur. Die Sommerhitze wirkt sich also stark auf die Quelltemperatur aus, und im Herbst gehen die Temperaturen wieder zurück. Zusammen mit dem beträchtlichen Jahresgang der stabilen Isotope, besonders bei Nr. 14 und 18 (siehe folgender Abschnitt) bedeutet das: Im hintersten Teil des EZG sickert das Regenwasser vielerorts weder tief in den Berg ein (bis um ca. 10 m), noch hält er sich dort lange auf. Am Rindbachursprung (Nr. 16) ist der Effekt am schwächsten ausgeprägt. Die Isotopie schwankt an dieser Stelle aber nur sehr wenig, und wir schließen daraus, dass im Einzugsgebiet von Nr. 16 ein größerer Dolomitaquifer vorliegt, mit oberflächlicher, ebenfalls Wasser führender Deckschicht (Zerlegungszone), die den seichten Einfluss bewirkt.

Abbildung 14 Jährliche Wasser-Temperaturschwankungen der ausgewählten Quellen (Balken: Mai/Juli 2023, Kreuze: September 2023), verglichen mit der Jahresmitteltemperatur der Luft in der Höhe des jeweiligen Quellaustritts (lange Querbalken)



Starke Temperaturunterschiede zwischen Frühjahr und Herbst sind auch in den hoch gelegenen Quellen auf der Tennalm (Nr. 06) und im Karbertalgraben (Nr. 07, 08) zu verzeichnen. Im Gegensatz zu den vorbeschriebenen Quellen tritt hier der Temperaturhöhepunkt erst im Herbst, nicht schon im Sommer ein. Die tiefer bzw. am Fuß der Tennalm gelegenen Quellen (Nr. 09, 10, 11, 13) weisen nur geringe Schwankungen auf. Nr. 10 hat dabei nicht nur die geringste Temperatur, sondern schüttet auch in Trockenzeiten bemerkenswert konstante Mengen um 30 l/s. Es handelt sich daher wiederum um einen größeren Grundwasserspeicher. Es könnte sein, dass die Karstquelle Nr. 09 denselben Aquifer entwässert, und nur bei ausreichend hohem Bergwasserspiegel nach Starkregen anspringt.

Quellwasser-Isotopie

Wasser-Isotopenmessungen werden in den beiden folgenden Abbildungen interpretiert. Im Vergleich mit der Isotopie des Niederschlags, Abbildung 15, werden etwaige Veränderungen des versickerten Regenwassers im Kontakt mit dem Boden und dem Gestein des Grundwasserleiters erkennbar. Die ^{18}O - und ^2H -Daten (Sauerstoff-18, Deuterium) werden gegeneinander aufgetragen und die am Niederschlag bestimmten Werte linear korreliert, wobei sich die regionale Niederschlagslinie ergibt. Als Datengrundlage werden die angegebenen ANIP-Messstationen des Umweltbundesamtes verwendet. Die resultierenden, regionalen

Ausgleichslinien liegen beidseitig eng an der von Dansgaard (1964) allgemein für die nördliche Hemisphäre veröffentlichten Niederschlagslinie, die grün strichliert zum Vergleich mit abgebildet ist. Die beiden schwarzen Dreiecke bezeichnen die beiden Messwerte der Wetterstation bei der „Sandgrube“ (Probe aus dem Ombrometer abgeschlaucht). Sie liegen auf einer parallel nach rechts verschobenen Niederschlagslinie, d.h. das Niederschlagswasser in dieser Station ist starker Verdunstung ausgesetzt und kann nicht zum Vergleich zwischen Quellwasser und Niederschlag herangezogen werden.

Abbildung 15 Wasser-Isotopenmessungen verglichen mit der Isotopie des Niederschlags

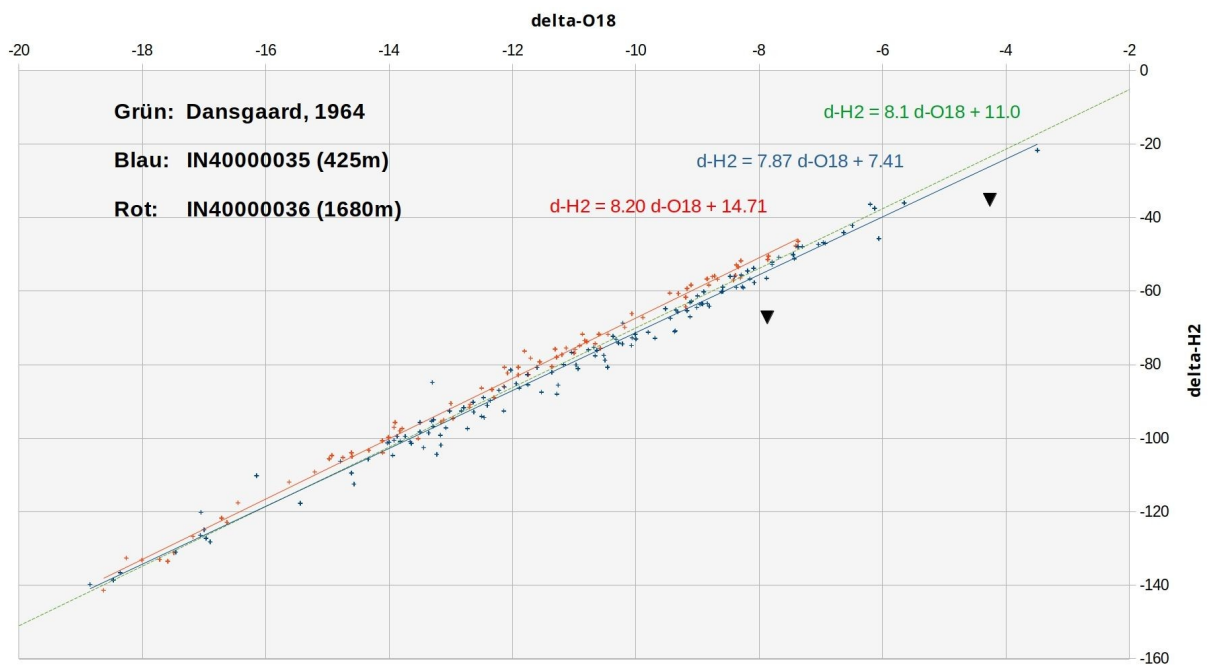
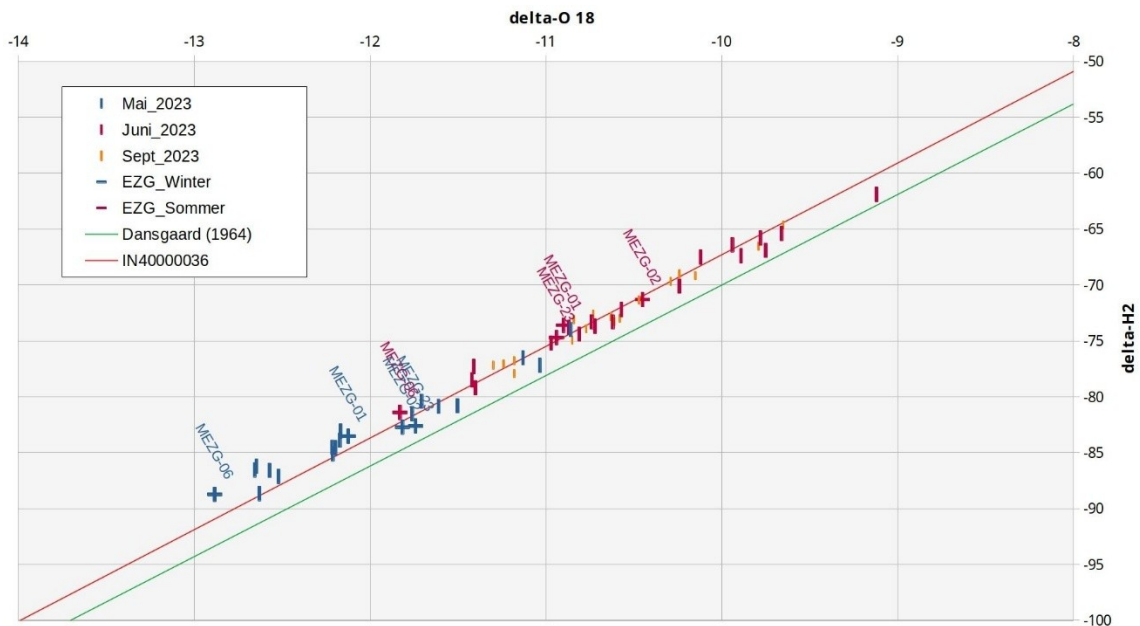


Abbildung 16 zeigt die Lage unserer Quellwasser-Messwerte in diesem Diagramm. Sie liegen entlang der roten Niederschlagslinie, abgeleitet von der höher gelegenen ANIP-Messstelle. Die Jahreszeit der Probenahme ist farblich differenziert, durch Kreuze werden die Werte aus Mai und Juli 2023 für die Quellen Nr. 01, 02, 06, 07, 18 und 23 gekennzeichnet, für die man die mittlere Höhe der Infiltrationsgebiete vergleichsweise gut abschätzen kann.

Abbildung 16 Isotopenlage der Quellwasser-Messwerte



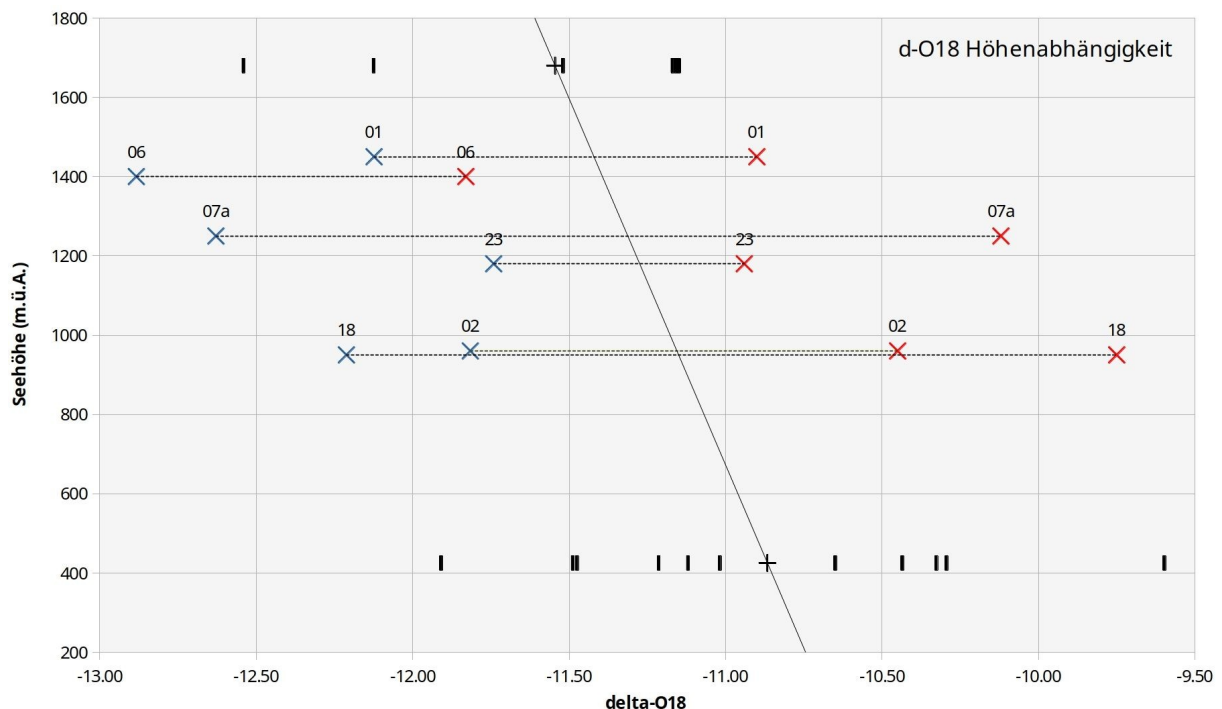
Alle Werte liegen im Schwankungsbereich des Niederschlags, und es lassen sich weder ein Verdunstungseinfluss (Abweichung nach rechts unten) noch eine signifikante Reaktion mit dem Nebengestein (Abweichung nach links oben) ablesen. Die Sommerwerte (rot) sind entlang der Niederschlagslinie nach rechts verschoben („isotopisch angereichert“ oder „schwerer“, ^{18}O und ^2H sind schwerer als die Standardisotope) gegenüber den Frühjahrswerten (blau, „abgereichert“), während die Streuung in etwa gleich bleibt. Dass die Isotope im Sommer wesentlich „schwerer“ werden (weniger abgereichert relativ zum Meerwasser), ist beim Niederschlag normal, hinsichtlich der Quellen bedeutet es jedoch, dass die meisten Quellen mehr oder weniger von lang anhaltenden und reichlichen Niederschlägen direkt beeinflusst werden („direkt“ heißt: durch Niederschlagswasser, nicht nur durch Erhöhung des Abflussgradienten im Grundwasser), bzw. dass die Aquifere zu klein sind, um viele Jahresgänge absorbieren und durchmischen zu können. Tatsächlich hatten wir zeitweise heftige Niederschläge vor und während der Messkampagne im Juli 2023, was aber nicht bedeutet, dass diese spezifisch für die Anreicherung verantwortlich sind. Umgekehrt ist die starke Abreicherung der Frühjahrswerte durch Versickerung im Winter und die Schneeschmelze bedingt.

Das Ausmaß der Pufferung des Jahresgangs kann man anhand der Differenz der ^{18}O -Werte von Mai und Juli (im Folgenden bez. $\Delta^{18}\text{O}$) einschätzen. Je größer die Differenz, desto kurzfristiger der Niederschlagseinfluss auf den Aquifer und desto kleiner seine Speicherwirkung. Am höchsten ($\Delta^{18}\text{O} > 1.95$) ist sie bei den Quellen Nr. 07, 08, 14, 15 und 18. Alle diese haben

Besonderheiten: Quellgerinne Nr. 07 und 15 sickern aus der Bodendecke aus, Quelle Nr. 08 tritt unter einer Anschüttung hervor (Parkplatz unterhalb der Gasselhütte), Nr. 14 ist eine gefasste Quelle unterhalb der Forststraße am Rand einer Moränenablagerung, und Nr. 18 liegt zwischen zwei Gräben, von denen eventuell Wasser zusickern könnte (die Quelle schüttet aber auch, wenn die Gräben trocken sind). Ein direkter Niederschlagseinfluss ist auch leicht erklärbar im Falle der Quellen Nr. 01, 02, 03, 06 und 23, weil entweder angrenzende Schutt- (01, 03) bzw. Moränendecken (02) eine Rolle spielen können, oder weil oberflächennahes Grundwasser angenommen werden muss (06 und 23 auf verkarsteten Plateaus). Im Karbentalgraben nimmt $\Delta^{18}\text{O}$ in der Reihenfolge der Messstellen Nr. 07, 08, 09, 10, und 11 von oben nach unten hin ab. Je tiefer die Quelle unterhalb des Grates bzw. Tennalm-Plateaus liegt, um so größer ist erwartungsgemäß das entwässerte Fließsystem (Gebirgsvolumen). Im EZG insgesamt am geringsten ist die Differenz ($\Delta^{18}\text{O} < 0.4$) zwischen Frühjahr und Sommer bei den Messstellen Nr. 04 (Aloisibründl), Nr. 16 (Rindbachursprung) und Nr. 21 (Ostfuß des Eibenbergs).

In Abbildung 17 wird die mittlere Höhe des Infiltrationsgebiets geeignet ausgewählter Quelle (Kreuze in Abbildung 16) mit der bekannten Höhenabhängigkeit der ^{18}O -Werte im Niederschlag verglichen. Aus den Jahresmittelwerten der genannten ANIP-Stationen (kleine schwarze Balken) wird ein provisorischer Zusammenhang abgeleitet, der als schwarze Linie eingetragen ist. Man sieht die enorme Schwankungsbreite der Jahresmittelwerte, und es ist klar, dass man für verlässliche Schlussfolgerungen langjährige Messreihen und Mittelwerte der Quellwässer benötigen würde. Es ist aber doch interessant, dass die gemessenen Frühjahrs- und Sommerwerte der Quellen, für die man die mittleren Einzugsgebietshöhe relativ gut schätzen kann, ziemlich symmetrisch um diese Linie liegen.

Abbildung 17 Vergleich der mittleren Höhe ausgewählter Quellen mit der bekannten Höhenabhängigkeit der ^{18}O -Werte im Niederschlag



Quelle Nr. 06 (Tennalm) ist davon eine auffällige Ausnahme. Wenn diese starke, relative ^{18}O -Abreicherung des Jahresgangs tatsächlich für die Infiltration auf der Tennalm charakteristisch ist, dann kann man daraus schließen, dass die Infiltration ins oberflächennahe Grundwasser der Tennalm hauptsächlich im Winter und während der Schneeschmelze stattfindet. Dieses Grundwasser ist einerseits seicht genug, dass sich das jahreszeitliche Boden-Temperatursignal aufprägt, und andererseits tief genug (im Meterbereich), dass der Temperatur-Höhepunkt zeitverzögert erst im Herbst erreicht wird (siehe Abbildung 14).

Die Tritium-Konzentration wurde an den Quellen Nr. 02, 04, 06, 10, 11, 13, 16, und 21 bestimmt. Diese Werte sind in Abbildung 19 weiter unten zum Thema Fließsysteme eingearbeitet und werden dort interpretiert.

Abflussverhalten

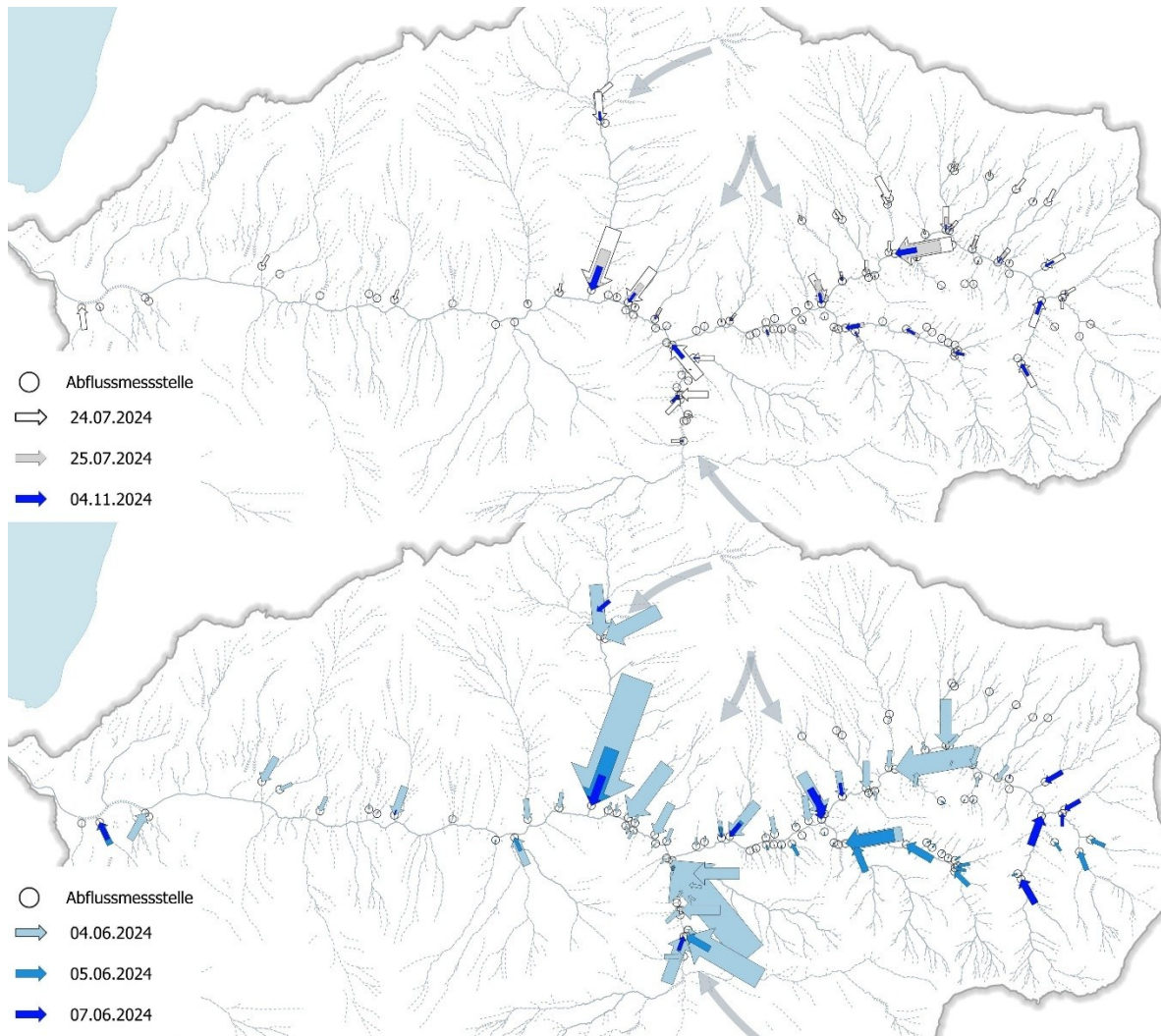
Laut Climate Change Center Austria, Klimastatusbericht 2024 (das Jahr, in dem die Messungen stattfanden), war dieses Jahr „mit großem Abstand das wärmste Jahr in Oberösterreichs Messgeschichte“, und sowohl Winter 2023/2024 als auch Frühling 2024 „rekordwarme Jahreszeiten“. Die erste Messkampagne im April 2024 war ursprünglich gedacht gewesen, den Abfluss zur Zeit der Schneeschmelze zu beobachten. Während jedoch Anfang Mai 2023,

kurz vor der ersten hydrochemischen Beprobung, die Steinalm zum Beispiel noch nicht befahrbar gewesen war, hatte Anfang April 2024, kurz vor den ersten Abflussbeobachtungen, die Schneeschmelze bereits geendet.

Mai und Juni 2024 waren überdurchschnittliche Niederschlagsmonate. „Dauerregen in Kombination mit Starkregen Ende Mai/Anfang Juni führte in Teilen des Bundeslandes zu Hochwasser“ (Climate Change Center Austria). Juli und August 2024 waren unterdurchschnittliche Monate, aber regional begrenzte Starkregen führten lokal auch zu Hochwässern und Rutschungen. Der September 2024 brachte enorme Regenmengen und schwere Überschwemmungen. Aus Sicherheitsgründen wurde eine Exkursion ins EZG abgesagt und es fanden keine Messungen statt. Ende Oktober bis Mitte November 2024 war eine Trockenperiode.

Abbildung 18 veranschaulicht die Ergebnisse der drei Abflussmesskampagnen von Juni, Juli und November 2024. Diese Messungen erfassten drei der oben beschriebenen Situationen: 1. Hochwasser nach Dauerregen und zeitweise Starkregen (Anfang Juni), 2. erhöhter Abfluss nach heftigen Gewitterregen in einer ansonsten eher trockenen Periode (Ende Juli), und 3. minimaler Abfluss bei trockener Witterung. Die zuletzt genannte Situation entsprach auch den bei der Kartierung im trockenen Hochsommer 2022 beobachteten Verhältnissen. Die Pfeile sind flächenproportional zur Quadratwurzel des Abflusses (der größte Pfeil entspricht 300 l/s), mit der Spitze an der Messstelle, und differenziert nach Messdatum. Eine „Simultanmessung“ an einem Tag war für den einzigen Beobachter nicht möglich. Das ist vor allem für die Betrachtung der unteren Teilabbildung relevant.

Abbildung 18 Ergebnisse der drei Abflussmesskampagnen von Juni, Juli und November 2024



An den wiederholt gemessenen Stellen wird deutlich, dass der Hochwasserabfluss zumeist innerhalb weniger Tage stark absinkt, fast auf normale Verhältnisse. Die Karstquellen im Karbertal- und im Lochbachgraben (Quellen Nr. 09 und Nr. 20) hatten schon am dritten Messtag im Juni keinen Abfluss mehr. Anders verhalten sich die Dolomitkarstquelle (Nr. 13a) und die nebenan gelegene dauerhafte Quelle Nr. 13. Nr. 13a fällt wesentlich langsamer ab, und Nr. 13 war nach vier Tagen im Juni und nach zwei Tagen im Juli sogar angestiegen. Der Höhepunkt des Oberflächenabflusses findet während der Starkregenperiode statt, und war am ersten Messtag kurz nach den Unwettern Ende Mai/Anfang Juni 2024 schon vorbei (aber noch erkennbar an oberflächlichen Anschwemmungen und Vegetationsspuren).

Besonders auffallend an beiden Teilabbildungen sind die geringen Abflüsse aus den Gräben im kalkdominierten Gebiet westlich des Karbertalgrabens, sogar im „normalen“ Hochwasserfall. Auch hier muss davon ausgegangen werden, dass der Höhepunkt bereits in der Vergangenheit lag. Diese Gräben benötigen offenbar Regenfälle wie im Mai/Juni 2024, um überhaupt signifikant „anzuspringen“. Der Waltersgraben benötigt noch wesentlich größere Regenmengen, da er auch im Juni 2024 trocken blieb (der eingetragene Pfeil links in der unteren Teilabbildung war ein seitlicher Zutritt, wahrscheinlich aus dem lokalen Terrassenkörper und darüber gelegenen Schwemmkegel). Am 13. und 14. September 2024, nach tagelangen starken Regenfällen, die in Folge österreichweit zu Überschwemmungen führten, wurde am Waltersbach ca. 30 bzw. ca. 45 l/s Abfluss beobachtet, während am Tag zuvor (12. September) noch kein Wasser geflossen war (eigenartigerweise war aber kein seitlicher Zutritt wie im Juni zu sehen). Das Einzugsgebiet des Waltersbachs westlich des Eibenbergs hat offenbar ein regional hohes Rückhaltevermögen, wahrscheinlich infolge der hier verbreiteten mächtigen, porösen Deckschichten aus Rutschmassen und Moränen. Im betrachteten Fall war der Niederschlag oberhalb ca. 1000 m außerdem zunächst als Schnee gefallen, sodass auch dies zu einer zeitverzögerten Reaktion beigetragen haben kann.

Fließsysteme

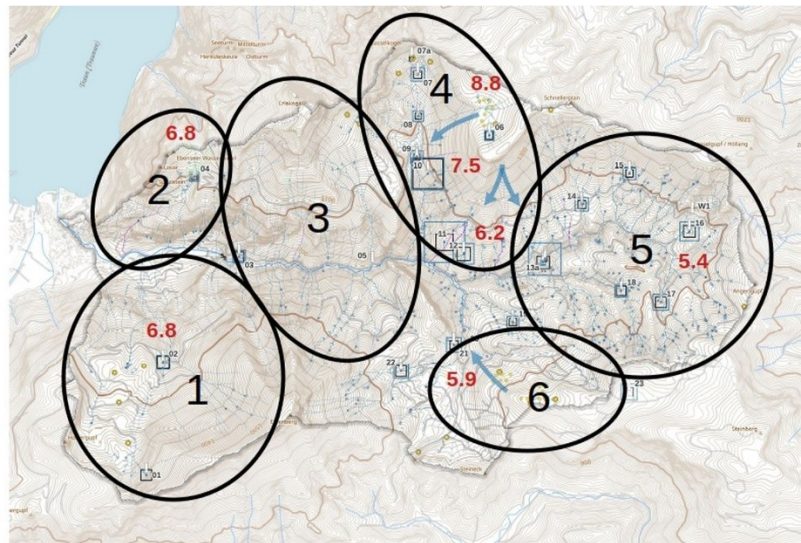
Abbildung 19 versucht, die beschriebenen Beobachtungen und Messergebnisse in Hinblick auf lokal wirksame Fließsysteme im EZG zu interpretieren. Es geht dabei mehr um typisch hydrogeologische Fragen bezüglich Gebirgswasserhaushalt und weniger um Fragen der Hochwasserbildung. Die Tritium-Messungen an den Quellen Nr. 02, 04, 06, 10, 11, 13, 16, und 21 sind mit roten Zahlen eingetragen (Konzentration in Tritium Units, TU). Die wesentlichen Merkmale von sechs grob umrissenen Bereichen mit erkennbarer hydrogeologischer Charakteristik sind in der Legende kurz angeführt.

Abbildung 19 Beschreibung der Fließsysteme im MEZG-Rindbach

Umriss der Fließsysteme:

- 1) Versickerung > 10 m, rel. geringe, aber konstante Quellschüttung
- 2) Seichtes GW, etwas längere Verweilzeiten (einige Jahre)
- 3) Episodischer Abfluss der meisten Gräben, wenige Quellen
- 4) Größeres Reservoir, zwei Quelltypen (geringe / hohe Schwankung, Kalk- und Dolomitkarst)
- 5) Sehr seichtes GW im Dolomit, viele Quellen, starker Temp.-Jahresgang
- 6) Karstartiger Abfluss (Kalkstock mit einer Karstquelle im Lochbach)

Tritium-Konzentration [TU]



Die Tritium-Konzentrationen liegen alle im heutigen Wertebereich von rezenten Wässern (um ca. 7.0 TU), d.h. die mittleren Verweilzeiten sind höchstens in Jahren zu messen, keinesfalls in Jahrzehnten. Die sehr kurzen Verweilzeiten (wahrscheinlich unter einem Jahr) im hinteren östlichen und südöstlichen EZG (System Nr. 5 bzw. Nr. 6) werden bestätigt, und im ersteren Fall durch seichten, unterirdischen Abfluss in Dolomit-Deckschichten (oder Auflockerungszonen), und im zweiten Fall durch Karstabfluss im Plattenkalk der Steinalm erklärt. Höhere Verweilzeiten ergeben sich für die Systeme im nicht verkarsteten Plattenkalk des Eibenbergs (Nr. 1) und in den mergeligen Schichten um die Spitzlsteinalm (Nr. 2). System Nr. 2, obwohl seicht (saisonale Temperaturschwankungen), puffert den Jahresgang der stabilen Isotope; System Nr. 1 reicht tiefer ins Gebirge (konstant niedrige Temperatur), unterliegt aber stärkeren Schwankungen der stabilen Isotope, vielleicht durch überlagerten Einfluss von seichteren Deckschichten (Schuttschürzen; diesbezüglich vergleichbar auch der Rindbachursprung, Quelle Nr. 16).

Im Karststock der Tennalm (System Nr. 4) gibt es drei verschiedene Abflussregime. (1) Das Grundwasser in den Deckschichten des Plateaus (Quelle Nr. 6), wird hauptsächlich in der kalten Jahreszeit erneuert (starke ^{18}O -Abreicherung), macht hinsichtlich Temperatur die sommerliche „Hitzewelle“ mit (nur etliche Meter Tiefe), hat aber die höchste durchschnittliche Verweilzeit im EZG (wenige Jahre). Die moderaten, saisonalen ^{18}O -Schwankungen erklären sich vermutlich, ähnlich wie bei System Nr. 1 (Quelle Nr. 2), durch den überlagerten Einfluss von Bodenwasser im Bereich des sehr seichten Quellaustritts. (2) Der Karststock enthält einen relativ großen und tief reichenden Aquifer, den die Quellen Nr. 9 bis 13 und

die Dolomitkarstquelle Nr. 13a mit konstant niedriger Temperatur entwässern. Die außerhalb der Regenperioden konstant und reichlich schüttende Quelle Nr. 10 führt die zweithöchste Tritium-Konzentration im EZG und verweist damit auf eine etwas höhere mittlere Verweilzeit des Grundwassers relativ zu angrenzenden Gebieten. Die oberhalb gelegene Karstquelle Nr. 9 springt vermutlich an, wenn der Bergwasserspiegel in dem normal durch Quelle Nr. 10 entwässerten Aquifer ausreichend gestiegen ist, was bei anhaltenden Starkregen rasch geschehen kann. (3) Die tiefer gelegenen Quellen Nr. 11 bis 13 und 13a puffern den 180-Jahresgang ebenso gut oder besser (als Nr. 10, bes. Nr. 11), weisen jedoch wesentlich stärkere Abfluss-Schwankungen auf. Wir interpretieren dies als bimodales Abflusssystem, wobei sich eine Entwässerung von tiefer gelegenen, gut durchmischten Teilen des Aquifers, die auf Schwankungen des Bergwassergradienten reagieren, mit Abflussspitzen im Dolomitkarst überlagern, die einen mehr direkten Regenwassereinfluss bewirken.

AP 4: Boden und Standort

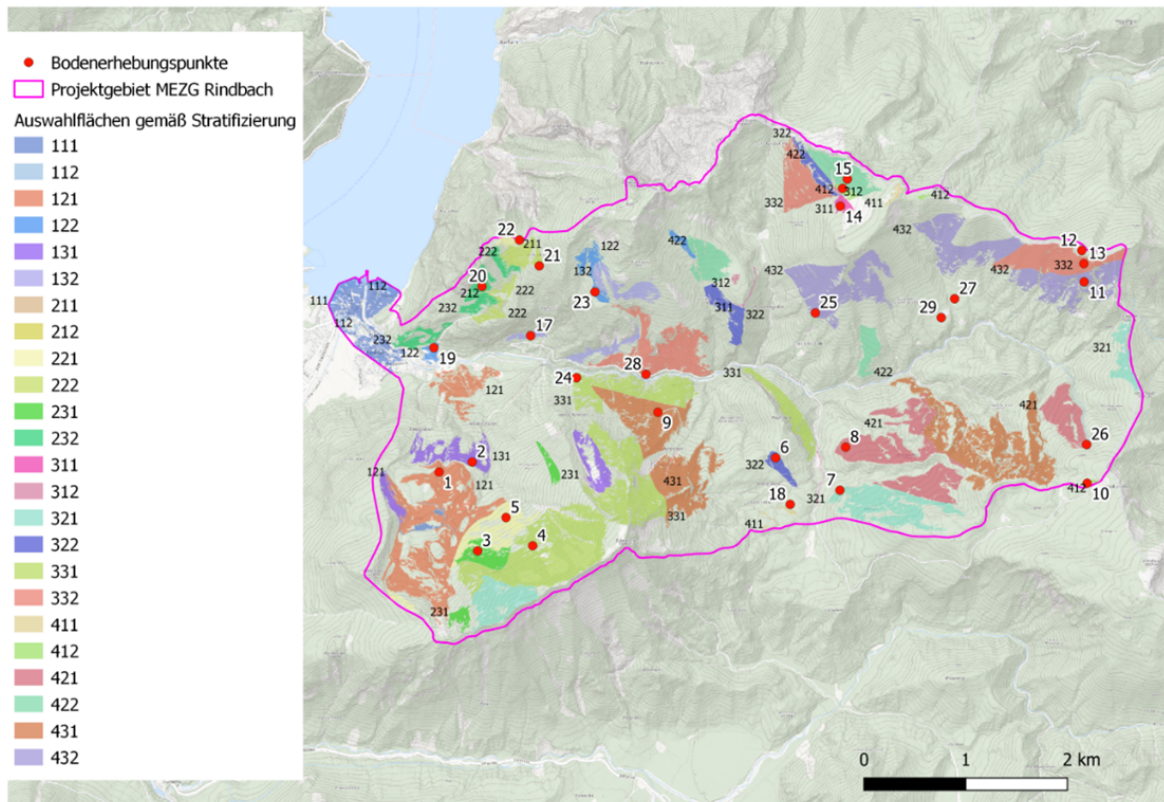
Kerstin Michel, David Keßler, Rainer Reiter, Barbara Kitzler, Gabriele Walli, Raffaella Wettl

In Arbeitspaket 4 wird die Erfassung und Regionalisierung bodenhydrologischer (-physikalischer) Kennwerte (z.B. Mächtigkeit, Durchlässigkeit, Skelettanteil, Porenvolumina, Leitfähigkeit, u.a.) und bodenchemischer Daten (pH-Wert, Nährstoffausstattung, KAK, *C*, *N*, u.a.) durchgeführt. Dies basiert auf Punktaufnahmen als Grundlage für spätere Wasserhaushalts- und Nährstoffmodellierungen – mit entsprechender Datenaufbereitung und Anwendung geeigneter Regionalisierungsverfahren. Alle Ergebnisse enden in flächig-thematischen Karten.

Vorstratifizierung des Projektgebietes für die Probeflächenauswahl

Aufgrund des von vornherein festgesetzten Probenumfanges von 125 Einzelproben (25 Einzelproben der organischen Auflage, 100 Mineralbodenproben) wurde eine Vorstratifizierung des Untersuchungsgebietes nach 3 Kriterien durchgeführt (chemischer Substrattyp, Neigungsklasse und Exposition). Als Grundlage für die Auswahl der Flächen diente die geologische Karte im Maßstab 1:50000, gegliedert nach der chemischen Substratgesellschaft (SGes) sowie das Digitale Höhenmodell mit 1m Auflösung und den daraus abgeleiteten Neigungen und Expositionen. Es wurden nur Flächen berücksichtigt, die eine zusammenhängende Mindestgröße von 1000 m² aufwiesen. In einem weiteren Schritt wurden kleinere Lücken, welche sich aufgrund der Genauigkeit des 1-m Höhenmodells naturgemäß ergeben, im GIS automatisiert eliminiert. Innerhalb der so entstandenen Polygone wurde im Zuge der Felderhebungen von den Beprobungsteams gutachtlich eine geeignete Beprobungsstelle ausgesucht. Der endgültige Umfang der Erhebungspunkte erhöhte sich von 25 auf 29, da aufgrund von hoch anstehendem Festgestein an einigen Punkten nicht der volle Umfang von 4 Mineralbodentiefenstufen erreicht werden konnten. Punkte 27 und 29 liegen in einer zusätzlichen, als Moränenmaterial klassifizierten Fläche. Abbildung 20 zeigt die Lage der Auswahlflächen gemäß der Vorstratifizierung sowie die Lage der 29 Bodenprobepunkte.

Abbildung 20 Übersicht über die Bodenerhebungspunkte und die Auswahlpolygone aus der Vorstratifizierung. Dabei stellt die Hunderterstelle der Zahl der Auswahlpolygone den chemischen Substrattyp (Tabelle 2) dar, die Zehnerstelle die Neigungsklasse und die Einerstelle die Exposition



Nachfolgend sind die Kriterien für die Vorstratifizierung im Detail erläutert.

Chemischer Substrattyp (SGes):

Im Projektgebiet kommen laut geologischer Kartierung vier Klassen vor: k.A.; C +; K0/K +; D – (siehe Tabelle 2). Der Code der SGes entspricht der Hunderterstelle der Auswahlflächen in der Übersichtskarte in Abbildung 20.

Tabelle 2 Chemische Substrattypen (SGes) für die Auswahlpolygone

Code	SGes	Chemische Substrattypen	Hauptgemengeteile	Gesteinstypen, lithologische Einheiten
100	k.A.	Keine Angabe, da unterschiedliche Materialien möglich	-	Schuttkegel, Schwemmkegel, Rutschmassen, Bergsturzmaterial, Moränenmaterial, jüngere Talfüllungen, Bachablagerungen, etc.
200	C+	Silikatisch-Carbonatreiche Gesteine tonreich	$\geq 25/30\%$ Tonminerale + basische Minerale, 35-75% Carbonat	Rückstandsreiche tonige Mischgesteine (Mergel, Kalkmergel)
300	K0/ K+	Kalkgesteine – neutral / tonreich	85-95% Carbonat, davon $>50\%$ Ca-Carbonat/ 75-85% Carbonat, davon $>50\%$ Ca-Carbonat, $>15\%$ Tonminerale + basische Minerale	Durchschnittliche Kalkgesteine / Rückstandsreiche Carbonate (Mergelkalke u.ä.)
400	D-	Dolomitischer Kalk, Dolomit tonarm	$\geq 95\%$ Carbonat, davon $\geq 50\%$ Dolomit	rückstandarme reine Dolomite, Dolomitisierte Kalke

Neigung:

Die Neigung wurde in drei Klassen (Code 10 = 0-10°; Code 20 = 10 – 30°; Code 30 = 30 – 45°) eingeteilt. Steilere Hangabschnitte wurden aus Sicherheitsgründen bzw. aus Mangel an Bodenmaterial in den Felswänden (z.B. im Karbertalgraben oder unterhalb der Spitzelsteinalm) ausgespart. Der Code der Neigungsklasse entspricht der Zehnerstelle der Auswahlflächen in der Übersichtskarte in Abbildung 20.

Exposition:

Hier wurden im Wesentlichen zwei Klassen (Code 1 = Nord (270-135°); Code 2 = Süd (135-270°)) ausgeschieden. Der Code der Expositionsklasse entspricht der Einerstelle der Auswahlflächen in der Übersichtskarte in Abbildung 20.

Bodenbeschreibung und- probenahme

Im Zeitraum vom 5. Mai bis 22. Juni 2023 wurden auf 29 Flächen innerhalb des MEZG-Rindbach Vollerhebungen (Bodenprofilansprache, Probenwerbung von Bodenmaterial für chemische und physikalische Analysen, Vegetationserhebung) durchgeführt.

Die Vollerhebung umfasste eine detaillierte Beschreibung der allgemeinen Standortparameter (Geländeform, Relief, Seehöhe, Neigung, Exposition, Wasser - und Nährstoffhaushalt, Bodengründigkeit, Kleinklimatische Besonderheiten, Stein- und Schuttbedeckung) sowie des Ausgangsmaterials auf Basis einer chemischen sowie genetischen Einordnung. Es folgten eine gesonderte Beschreibung und Beprobung der organischen Auflage (25x25 cm Humusrahmen) und des Mineralbodens anhand einer Profilgrube. Erfasst wurden die Humusform und der Bodentyp gemäß Österreichischer Bodensystematik 2011 (Nestroy et al., 2011), die Mächtigkeit sowie das vorhandene Material (Holz, Moos, Laub, etc.) bzw. die Horizontierung der Auflage und des Mineralbodens nach genetischen Horizonten einschließlich der Ansprache des Gefüges, des Skelettgehaltes, Lagerungsdichte, Lockergesteinsschichten, Bodenart mittels Fingerprobe, hydromorphe Merkmale, Durchwurzelung, Horizontübergänge und -formen, Karbonatgehalt und Bodenfarbe. Die Beprobung des Mineralbodens erfolgte - soweit möglich - in vier festgelegten Tiefenstufen: 0-10, 10-20, 20-50 und 50-80 cm. Hierbei wurde jeweils nicht-volumensgerecht Material für die chemischen Bodenanalysen und Bodenartbestimmung sowie Stechzylinder zur Bestimmung der Lagerungsdichte entnommen.

Sämtliche Erhebungspunkte wurden mittels Vermarkungsrohr versehen, um in Kombination mit den aufgezeichneten Koordinaten ein Wiederauffinden zu ermöglichen, um potenzielle weiterführende Fragestellungen in Zukunft auf denselben Erhebungspunkten durchführen zu können.

Zur Bestimmung der Leitfähigkeit wurden zudem ungestörte Zylinder zur Analyse hydrologischer Kennwerte geworben. Die ungestörten Zylinder werden im Weiteren zur Ermittlung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit und zur Ermittlung des pF-Werts herangezogen, um zu ermitteln, wie stark das Wasser durch Adsorption und Kohäsion an die Bodenpartikel gebunden ist.

Abbildung 21 Beispiele für ein seichtgründiges (links; P15) und ein tiefgründiges Bodenprofil (rechts; P16).



Zudem wurde die Vegetation in der Baum-, Strauch-, Kraut- und Moosschicht nach Braun-Blanquet aufgenommen, um weitere Anhaltspunkte über trophische und hydrologische Eigenschaften der Standorte zu erhalten.

Laboranalysen

Alle Proben wurden am BFW in Wien protokolliert, luftgetrocknet und – abgesehen von den Proben, die zur Bestimmung der Lagerungsdichte verwendet wurden – auf 2 mm gesiebt. Steine, Wurzeln und frisches Pflanzenmaterial wurden entfernt.

Bereits durchgeführt wurde die Bestimmung der Trockenmasse, des Carbonat-, Gesamtkohlenstoff- und Gesamtstickstoffgehaltes sowie der Lagerungsdichte. Der gesamte Analysenumfang einschließlich Methodik ist Tabelle 3 zu entnehmen.

Tabelle 3: Analysenumfang einschließlich Methoden, Geräte und Referenzen.

Parameter	Methode	Gerät	Referenz
Auflage und Mineralboden			
Trockenmasse	Thermogravimetrie; Trocknung bei 105 °C bis zur Massenkonzanz	Thermogravimetrische Waage Mettler Toledo Moisture Analyzer HR73 (Mettler-Toledo, Intl. Inc., Greifensee, Schweiz)	ÖNORM L 1062
pH-Wert (Bodenazidität)	Messung im 0,01 M CaCl ₂ -Lösung; Boden-Lösungsverhältnis 1:5	pH-Elektrode pH-Meter 713 (Metrohm AG, Herisau, Schweiz)	ÖNORM L 1083, UNECE SA06
Gesamtkohlenstoff (C_{tot})	Verbrennung des C im Sauerstoffstrom bei 1250 °C, Infrarotdetektion des entstehenden CO ₂	Elementaranalysator LECO TruMac CN (Leco Instrumente GmbH, Mönchengladbach, Deutschland)	ÖNORM L 1080, UNECE SA08
Gesamtstickstoff (N_{tot})	Verbrennung des N im Sauerstoffstrom bei 1250 °C, Detektion mittels Wärmeleitfähigkeitsmeß- zelle	Elementaranalysator LECO TruMac CN (Leco Instrumente GmbH, Mönchengladbach, Deutschland)	ÖNORM L 1095, UNECE SA09
Carbonat (CO₃)	Auflösung der vorhandenen Carbonate durch HCl, gasvolumetrische Messung des entstehenden CO ₂	Calcimeter (Scheibler- Apparatur)	ÖNORM L 1084, UNECE SA07
organischer Kohlenstoff (C_{org})	kalkfreie Böden: C _{tot} = C _{org} kalkhaltige Böden: rechnerische Ermittlung: $C_{org} = C_{tot} - C_{CO_3}$		ÖNORM L 1080, ÖNORM L 1084, UNECE SA08
Säureauszug zur Bestimmung von Nährstoffen (Gesamtgehalt)	Mikrowellenaufschluss mit Salpetersäure	Mikrowelle Mars 6 (CEM, Kamp-Lintfort, Deutschland)	ÖNORM EN 16173
Nährstoff- und Schwermetallgesamtgehalte	Messung mittels optischer Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (inductively coupled	Optima 8300DV (PerkinElmer, Inc., Waltham, MA, USA)	ÖNORM EN 16173

Parameter	Methode	Gerät	Referenz
	plasma optical emission spectrometry, ICP-OES)		
Auszug für den Kationenaustausch	Extraktion mit 0,1 M Bariumchloridlösung Carbonathaltige Böden: Rücktausch mit Salzsäure (0,2 M)		ÖNORM L 1086-1
Analyse der Einzelkationen und der austauschbar gebundenen Protonen	Messung der Einzelkationen mittels optischer Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES); Bestimmung der austauschbar gebundenen Protonen anhand von pH-Messungen	Optima 8300DV (PerkinElmer, Inc., Waltham, MA, USA) pH-Elektrode pH-Meter 713 (Metrohm AG, Herisau, Schweiz)	ÖNORM L 1086-1
Berechnung der (effektiven) Kationenaustauschkapazität (KAK) und der Basensättigung (BS)	Berechnung anhand der Einzelkationen und der austauschbar gebundenen Protonen Carbonathaltige Böden: Korrektur der Calcium (Ca^{2+})- und Magnesium (Mg^{2+})-Konzentrationen mittels der Rücktauschwerte		ÖNORM L 1086-1
<i>Nur Mineralboden</i>			
Korngrößenanalyse	Pipettmethode nach Köhn		ÖNORM L 1061-2
Lagerungsdichte (Trockenrohdichte)	Ermittlung des Volumens und der Masse des Feinbodens unter Berücksichtigung des Bodenskeletts und vorhandener Wurzeln		ÖNORM EN ISO 11272

Datenauswertung

Die Labordaten wurden deskriptiven statistischen Analysen unterzogen. Hierbei wurden verschiedene Grundgesamtheiten herangezogen: Der gesamte Datensatz, Teildatensätze basierend auf den beprobten Tiefenstufen sowie für die im Einzugsgebiet vorherrschenden Bodentypen. Bis zu einer Tiefe von 80 cm konnten 20 der 29 Bodenprofile beprobt werden. Aufgrund von hohen Skelettgehalten bzw. anstehenden Festgesteins wiesen die übrigen Profile geringere Beprobungstiefen auf: sechs maximal 60 cm und drei lediglich 20 cm.

Laboranalysen

- Bodenphysikalische Eigenschaften:
 - *Textur*: Die Sandgehalte, die tendenziell mit der Tiefe zunahmen, reichten von 1 bis 74 % (Tabelle 4). Der niedrigste Schluff- bzw. Tongehalt lag bei 13 % bzw. 2 % (jeweils 50–80 cm); die Maximalwerte beliefen sich auf 80 % (50–80 cm) bzw. 58 % (20–50 cm). Dementsprechend vielfältig sind die im MEZG-Rindbach vorzufindenden Bodenarten, die beispielsweise lehmigen Sand, sandigen und schluffigen Lehm sowie lehmigen Ton und Ton umfassen.
 - *Lagerungsdichte*: Die Lagerungsdichten waren – wie für Waldböden typisch – fast ausschließlich als sehr gering ($< 1,25 \text{ g m}^{-3}$) einzustufen (nicht gezeigt). Lediglich drei Bodenproben wiesen Werte zwischen 1,25 und $1,45 \text{ g m}^{-3}$ und somit geringe Lagerungsdichten auf.
- Bodenchemische Eigenschaften:
 - In 0–10 cm Bodentiefe reichten die $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -Werte im Einzugsgebiet von 3.31 (sehr stark sauer) bis 7.25 (sehr schwach alkalisch). Für die tieferen Bodenschichten ergaben sich sehr ähnliche Werte (Tabelle 4, Abbildung 22). Die Spannweite des pH-Wertes belegt das Vorkommen sowohl versauerter als auch karbonatbeeinflusster Horizonte. Die Tatsache, dass insbesondere in den tieferen Bodenschichten (20–80 cm) die pH-Werte überwiegend bzw. gänzlich im Karbonatpufferbereich liegen (Abbildung 3), deutet – ebenso wie der Medianwert von 7.07 (nicht gezeigt) – auf die Dominanz karbonathaltiger Ausgangssubstrate im Untersuchungsgebiet hin.
 - Der Gehalt an organischem Kohlenstoff (C_{org}) wies mit Werten zwischen 16 und 264 g kg^{-1} (0–10 cm) eine große Spannweite auf. Erwartungsgemäß ergab sich eine deutliche Abnahme mit zunehmender Bodentiefe, welche die bodenchemischen Unterschiede humoser Böden mit A-C-Horizontabfolge und mineralisch dominierten Böden (A-B-C-Horizontfolge) verdeutlicht: Im Mittel enthielt die oberste Tiefenstufe mit $89 \text{ g C}_{\text{org}} \text{ kg}^{-1}$ drei- bzw. fast viermal mehr C_{org}

als die beiden untersten Tiefenschichten, die mittlere Gehalte von 32 bzw. 23 g C_{org} kg⁻¹ aufwiesen (Tabelle 4, Abbildung 22).

Tabelle 4: Deskriptive Statistik für ausgewählte physikochemische Bodeneigenschaften getrennt nach Auflage und Mineralbodentiefenstufen einschließlich Probenzahl. Korngrößenanalysen, also die Bestimmung Sand [%], Schluff [%] und Ton [%], wurden nur durchgeführt, wenn der C_{org}-Gehalt unter 5 % lag.

Parameter	Probenzahl (n)	Mittelwert ± Standardabweichung	Minimum	Maximum
Auflage				
pH _{CaCl2}	29	5,39 ± 0,92	3,80	6,77
C _{org} [g kg ⁻¹]	29	369 ± 6,8	233	481
N _{tot} [g kg ⁻¹]	29	16,3 ± 4,1	10,8	27,8
KAK _{eff} [mmol _c kg ⁻¹]	29	663 ± 279	227	1327
BS [%]	29	97 ± 4	82	100
P _{ges} [g kg ⁻¹]	29	1,06 ± 0,31	0,62	1,81
Cu [mg kg ⁻¹]	29	14 ± 4	7	22
Zn [mg kg ⁻¹]	29	112 ± 31	66	174
Cd [mg kg ⁻¹]	29	1,21 ± 0,94	0,32	5,59
0–10 cm				
Sand [%]	6 ^{a)}	19 ± 20	1	44
Schluff [%]	6	57 ± 16	40	75
Ton [%]	6	24 ± 4	16	31
pH _{CaCl2}	29	5,73 ± 1,37	3,31	7,25
C _{org} [g kg ⁻¹]	29	89 ± 57	16	264
N _{tot} [g kg ⁻¹]	29	5,6 ± 3,6	0,9	18,7
KAK _{eff} [mmol _c kg ⁻¹]	29	396 ± 305	70	1323
BS [%]	29	85 ± 26	18	100
P _{ges} [g kg ⁻¹]	29	0,76 ± 0,32	0,20	1,63
Cu [mg kg ⁻¹]	29	12 ± 5	4	22
Zn [mg kg ⁻¹]	29	116 ± 53	25	246
Cd [mg kg ⁻¹]	29	1,46 ± 1,07	0,08	4,69

Parameter	Probenzahl (n)	Mittelwert ± Standardabweichung	Minimum	Maximum
10–20 cm				
Sand [%]	19	15 ± 17	1	45
Schluff [%]	19	53 ± 13	28	68
Ton [%]	19	31 ± 8	15	47
pH _{CaCl2}	29	6,13 ± 1,45	3,42	7,40
C _{org} [g kg ⁻¹]	29	50 ± 31	9	134
N _{tot} [g kg ⁻¹]	29	3,1 ± 2,1	0,7	10,4
KAK _{eff} [mmol _c kg ⁻¹]	29	286 ± 188	45	783
BS [%]	29	82 ± 30	14	100
P _{ges} [g kg ⁻¹]	29	0,65 ± 0,33	0,20	1,58
Cu [mg kg ⁻¹]	29	10 ± 5	4	21
Zn [mg kg ⁻¹]	29	87 ± 33	36	152
Cd [mg kg ⁻¹]	29	1,23 ± 0,89	0,07	3,80
20–50 cm				
Sand [%]	22	24 ± 17	1	50
Schluff [%]	22	47 ± 11	27	65
Ton [%]	22	29 ± 15	5	58
pH _{CaCl2}	26	6,55 ± 1,34	3,48	7,54
C _{org} [g kg ⁻¹]	26	32 ± 24	7	94
N _{tot} [g kg ⁻¹]	26	1,7 ± 1,9	0,6	8,3
KAK _{eff} [mmol _c kg ⁻¹]	26	200 ± 127	54	513
BS [%]	26	87 ± 29	5	100
P _{ges} [g kg ⁻¹]	26	0,51 ± 0,28	0,15	1,35
Cu [mg kg ⁻¹]	26	10 ± 6	< BG	24
Zn [mg kg ⁻¹]	26	66 ± 41	12	201
Cd [mg kg ⁻¹]	26	0,97 ± 0,67	0,12	2,96
50–80 cm				
Sand [%]	19	32 ± 21	2	74
Schluff [%]	19	44 ± 15	13	80
Ton [%]	19	24 ± 16	2	54
pH _{CaCl2}	20	7,06 ± 1,03	3,65	7,66

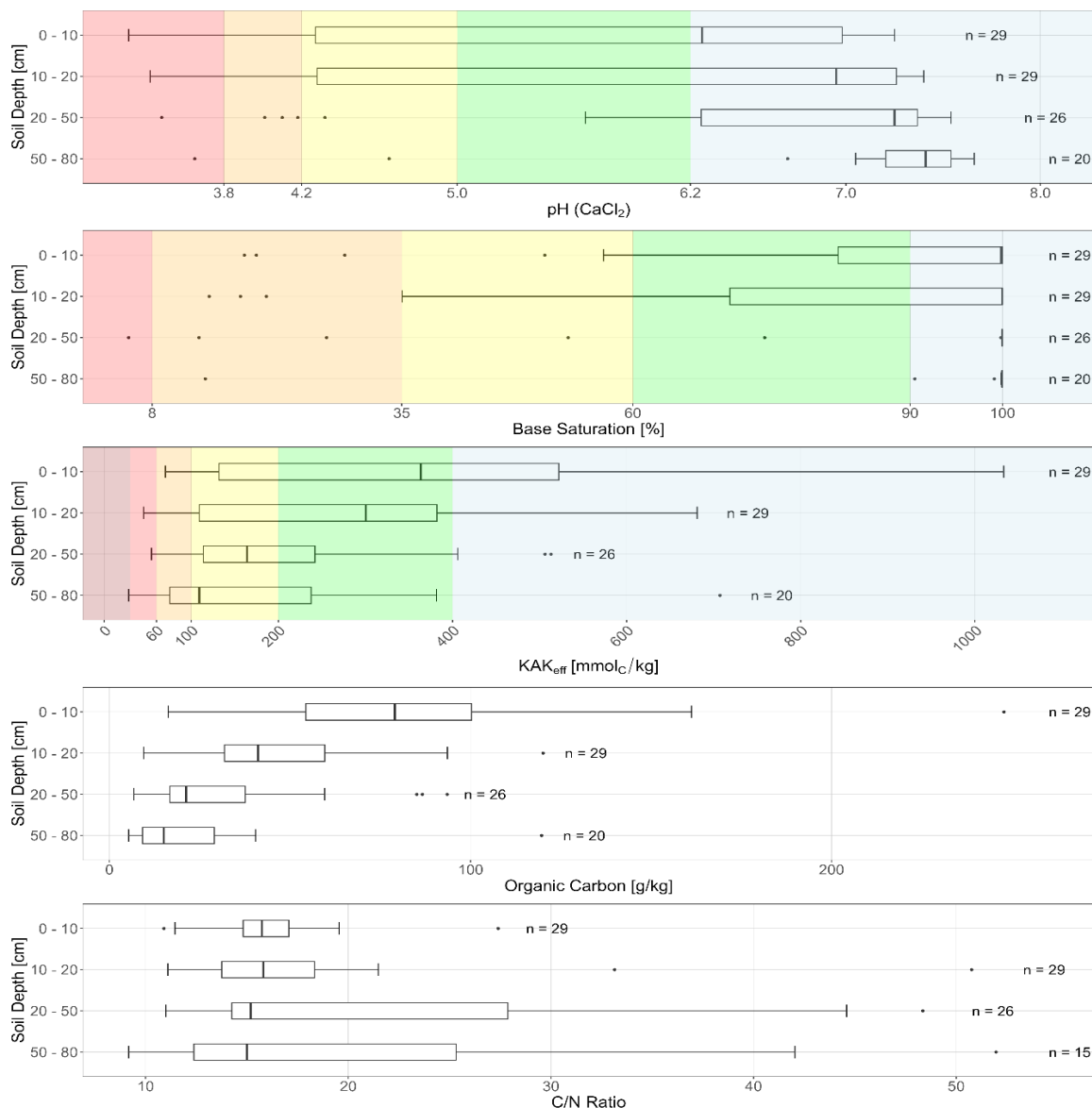
Parameter	Probenzahl (n)	Mittelwert $\pm$ Standardabweichung	Minimum	Maximum
C _{org} [g kg ⁻¹]	20	23 $\pm$ 15	5	120
N _{tot} [g kg ⁻¹]	20	1,0 $\pm$ 2,1	0,2	9,8
KAK _{eff} [mmolc kg ⁻¹]	20	174 $\pm$ 161	28	707
BS [%]	20	95 $\pm$ 19	14	100
P _{ges} [g kg ⁻¹]	20	0,48 $\pm$ 0,35	0,12	1,37
Cu [mg kg ⁻¹]	20	11 $\pm$ 8	< BG	28
Zn [mg kg ⁻¹]	20	50 $\pm$ 31	2	107
Cd [mg kg ⁻¹]	20	0,79 $\pm$ 0,74	0,09	3,43

Abkürzungen: C_{org}, organischer Kohlenstoff; N_{tot}, Gesamtstickstoff; KAK_{eff}, effektive Kationenaustauschkapazität; BS, Basensättigung; P_{ges}, Gesamtphosphor (Säureauszug); Cu, Kupfer (Säureextrakt); Zn, Zink (Säureextrakt); Cd, Cadmium (Säureextrakt); BG, Bestimmungsgrenze

Die mittleren C/N-Verhältnisse der beiden obersten Tiefenstufen (16 bzw. 17) sind jeweils als eng einzustufen. Insgesamt reicht die Spannweite von sehr eng (Minimum 11) bis weit (Maximum 27; 0–10 cm) bzw. sehr weit (Maximum 51; 10–20 cm; Abbildung 22). Die überwiegend engen C/N-Verhältnisse (< 20) deuten auf gute Bedingungen für mikrobielle Aktivität und somit – gemeinsam mit mittleren N_{tot}-Werten von 5,6 g kg⁻¹ (0–10 cm) bzw. 3,1 g kg⁻¹ (10–20 cm; Tabelle 4) im Oberboden – für die Freisetzung von organisch gebundenem Stickstoff hin.

Auch die effektive Kationenaustauschkapazität (KAK) und die Basensättigung (BS) variierten in den obersten zehn Zentimeter sehr stark mit Werten zwischen 70 und 1323 mmolc kg⁻¹ bzw. 18 und 100 %. Die teilweise sehr hohe KAK weist auf humusdominierte bzw. tonmineralreiche Horizonte hin. Die KAK nahm tendenziell mit der Tiefe ab, wie ein Vergleich der Mittelwerte der Auflage und der verschiedenen Tiefenstufen zeigt: 663 (Auflage) > 396 (0–10 cm) > 286 (10–20 cm) > 200 (20–50 cm) > 174 mmolc kg⁻¹ (50–80 cm; Tabelle 3). Der Medianwert von 201 mmolc kg⁻¹ (nicht gezeigt) ist typisch für moderat bis gut versorgte Waldböden. Die Mittelwerte der BS von 82 % (10–20 cm) bis 95 % (50–80 cm) unterstreichen die Dominanz basenreicher, karbonatischer Standorte, wohingegen die Standardabweichung, die bis zu 30 % beträgt, die ausgeprägte Heterogenität im Einzugsgebiet widerspiegelt (Tabelle 4, Abbildung 22).

Abbildung 22 Boxplots der gemessenen bodenchemischen Parameter in Abhängigkeit von der Tiefenstufe; a) pH-Wert in CaCl_2 ; die farblich hinterlegten Pufferbereiche verdeutlichen bodenchemisch relevante Schwellen: $\text{pH} < 3.8$ = Aluminium-Eisen-Pufferbereich (rot), $3.8\text{--}4.2$ = Aluminiumpuffer (orange), $4.2\text{--}5.0$ = Austauschpuffer (gelb), $5.0\text{--}6.2$ = Silikatpuffer (grün), > 6.2 = Karbonatpuffer (blau); b) Basensättigung (%); Klassengrenzen basieren auf der Einteilung der Basenversorgungsstufen: $< 8\%$ = extrem basenarm (rot), $8\text{--}35\%$ = basenarm (orange), $35\text{--}60\%$ = mäßige Basenversorgung (gelb), $60\text{--}90\%$ = basenreich (grün), $> 90\%$ = basengesättigt (blau); c) Effektive Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff} , mmolc kg^{-1}); die farbliche Hinterlegung differenziert praxisnahe Versorgungsbereiche: < 30 = sehr gering (dunkelrot), $30\text{--}60$ = gering (rot), $60\text{--}100$ = mäßig (orange), $100\text{--}200$ = mittel (gelb), $200\text{--}400$ = hoch (grün), > 400 = sehr hoch (blau); d) Organischer Kohlenstoff (g kg^{-1}) und e) C/N-Verhältnis.



Die mittels Säureauszug extrahierten Schwermetalle (Pseudotalgehalte) und (langfristig verfügbaren) Nährstoffe zeigten analog zu den übrigen bodenchemischen Eigenschaften, wie in Tabelle 4 exemplarisch für Kupfer, Zink, Cadmium und Phosphor dargestellt, große Schwankungsbreiten.

Insgesamt dokumentieren die dargestellten Kenngrößen das breite Spektrum der Böden im Untersuchungsgebiet: von kalkhaltigen, flachgründigen Rendzinen über Kalkbraunlehme bis hin zu nährstoffärmeren podsolierten Standorten (siehe Kapitel).

Bodenchemische Eigenschaften und Nährstoffvorräte der Bodentypen im Einzugsgebiet

Nachfolgend wird die zuvor beschriebene Heterogenität der Standorte im MEZG-Rindbach exemplarisch anhand fünf verschiedener Bodentypen – Rendzinen (REZ), Kalkbraunlehme (KLB), karbonathaltige Braunerden (Cha-BRE), typische Braunerden (Typ-BRE) und typische Pseudogleye (PGT) – erläutert. Die chemischen Eigenschaften sowie die Nährstoffvorräte variieren sowohl zwischen den Bodentypen als auch innerhalb der Profile zwischen dem Oberboden (0–20 cm) und Unterboden (20–80 cm; Abbildung 23).

- Rendzinen (REZ) und Kalkbraunlehme (KLB) repräsentieren Böden mit kalkhaltigem Ausgangsgestein (Karbonatgehalt > 75 %), unterscheiden sich jedoch deutlich in ihrer Entwicklungstiefe und Profilgliederung. Rendzinen entwickeln sich typischerweise über rückstandsarm verwitterndem Ausgangssubstrat und sind substratbedingt meist skelettreich und oftmals flachgründig. Dementsprechend konzentrieren sich die organische Substanz und die pflanzenverfügbaren Nährstoffe auf den Oberboden, während der Unterboden nur eine geringe Rolle für die Nährstoffversorgung spielt (Abbildung 24). In der Analyse zeigen sich hohe Vorräte an C_{org} im Oberboden, die jedoch in tieferen Horizonten stark abnehmen. Der pH-Wert liegt durchwegs im Karbonatpufferbereich, die Basensättigung ist durchwegs bei etwa 100 %, die effektive Kationenaustauschkapazität (KAK) nimmt von Oberboden in den Unterboden stark ab. Diese Kombination ist typisch für Rendzinen.
- Im Gegensatz dazu repräsentieren Kalkbraunlehme (KLB) deutlich weiter entwickelte Böden mit tiefgründiger Profilbildung und entsprechenden Gehalten an Tonmineralen. Sie entstehen über rückstandsreich verwitternden Karbonatgesteinen und weisen eine schluffigtonige allochthone Deckschicht glazialer Herkunft auf. Charakteristisch ist eine hohe BS über das gesamte Profil hinweg (Abbildung 23). Der C_{org} -Gehalt ist im Oberboden ebenfalls hoch, sinkt jedoch weniger stark ab als bei den Rendzinen

(Abbildung 24). Die Kalium- und Phosphorvorräte sind nicht nur im Ober-, sondern auch im Unterboden überdurchschnittlich, was auf eine gute Nährstoffnachlieferung und Speicherfähigkeit hinweist (Abbildung 24). Gemäß österreichischer Bodensystematik gelten Kalkbraunlehme als leitungsfähige, tiefgründige Waldböden mit günstiger Wasser- und Nährstoffversorgung. Die Unterschiede zwischen beiden Bodentypen – insbesondere hinsichtlich Tiefe, Nährstoffspeicherung im Unterboden sowie Austauschkapazität – sind somit systematisch begründet und spiegeln sich klar in den Messwerten wider. Während Rendzinen funktional stark auf den Oberboden beschränkt bleiben und hierbei durch die hohen C_{org} -Gehalte geprägt sind, ist der Unterboden bei Kalkbraunlehmen wesentlich für die Nährstoffnachlieferung.

- Karbonathaltige Braunerden (Cha-BRE) sind hingegen auf Standorten auf silikatisch-karbonatischen Mischsubstraten (< 75 % Karbonat) vorzufinden. Die pH-Werte und BS zeigen insbesondere bis in eine Bodentiefe von 50 cm eine große Variabilität (Abbildung 23). In der Tiefenstufe 50–80 cm sind sowohl der pH-Wert als auch die BS sehr hoch (> pH 7 bzw. BS bis zu 100 %). Die Vorräte an C_{org} , Phosphor und Kalium sind, verglichen mit den anderen Bodentypen, sowohl im Ober- als auch Unterboden groß, wobei auch hier eine entsprechende Variabilität zu erkennen ist (Abbildung 24). Dies ist ein Hinweis auf unterschiedliche Verwitterungs- und Entkalkungsgrade innerhalb des Bodentyps karbonathaltige Braunerde.
- Typische Braunerden (Typ-BRE) sind hingegen auf Substraten mit < 2 % Karbonatgehalt anzutreffen bzw. auf Substraten, die vollständig entkalkt sind. Im MEZG-Rindbach wurde nur eine typische Braunerde in den Allgäuschichten aus verwittertem Fleckenmergel ausgewiesen, weshalb die grundsätzliche bodenchemische Variabilität dieses Bodentyps nicht entsprechend dargestellt werden kann. Die substratbedingten Einflüsse zeigen sich an relativ geringen pH-Werten (Aluminium- bzw. Austauscherpufferbereich), deutlich geringeren BS, Kationenaustauschkapazitäten und C_{org} , Kalium- und Phosphorvorräten als bei Böden der Karbonatserie (Abbildung 23 und Abbildung 24).

Abbildung 23 Boxplots der gemessenen bodenchemischen Parameter in Abhängigkeit der Tiefenstufe und des Bodenprofils (REZ = Rendzina, KLB = Kalkbraunlehm, Cha_BRE = carbonathaltige Braunerde, Typ_BRE = typische Braunerde, PGT = Typischer Pseudogley); a) pH-Wert in CaCl_2 ; die farblich hinterlegten Pufferbereiche verdeutlichen bodenchemisch relevante Schwellen: $\text{pH} < 3.8$ = Aluminium-Eisen-Pufferbereich (rot), 3.8–4.2 = Aluminiumpuffer (orange), 4.2–5.0 = Austauschpuffer (gelb), 5.0–6.2 = Silikatpuffer (grün), > 6.2 = Karbonatpuffer (blau); b) Basensättigung (%); Klassengrenzen basieren auf der Einteilung der Basenversorgungsstufen: $< 8\%$ = extrem basenarm (rot), 8–35 % = basenarm (orange), 35–60 % = mäßige Basenversorgung (gelb), 60–90 % = basenreich (grün), $> 90\%$ = basengesättigt (blau); c) Effektive Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff} , mmolC kg^{-1}); die farbliche Hinterlegung differenziert praxisnahe Versorgungsbereiche: < 30 = sehr gering (dunkelrot), 30–60 = gering (rot), 60–100 = mäßig (orange), 100–200 = mittel (gelb), 200–400 = hoch (grün), > 400 = sehr hoch (blau); d) Organischer Kohlenstoff (g kg^{-1}) und e) C/N-Verhältnis.

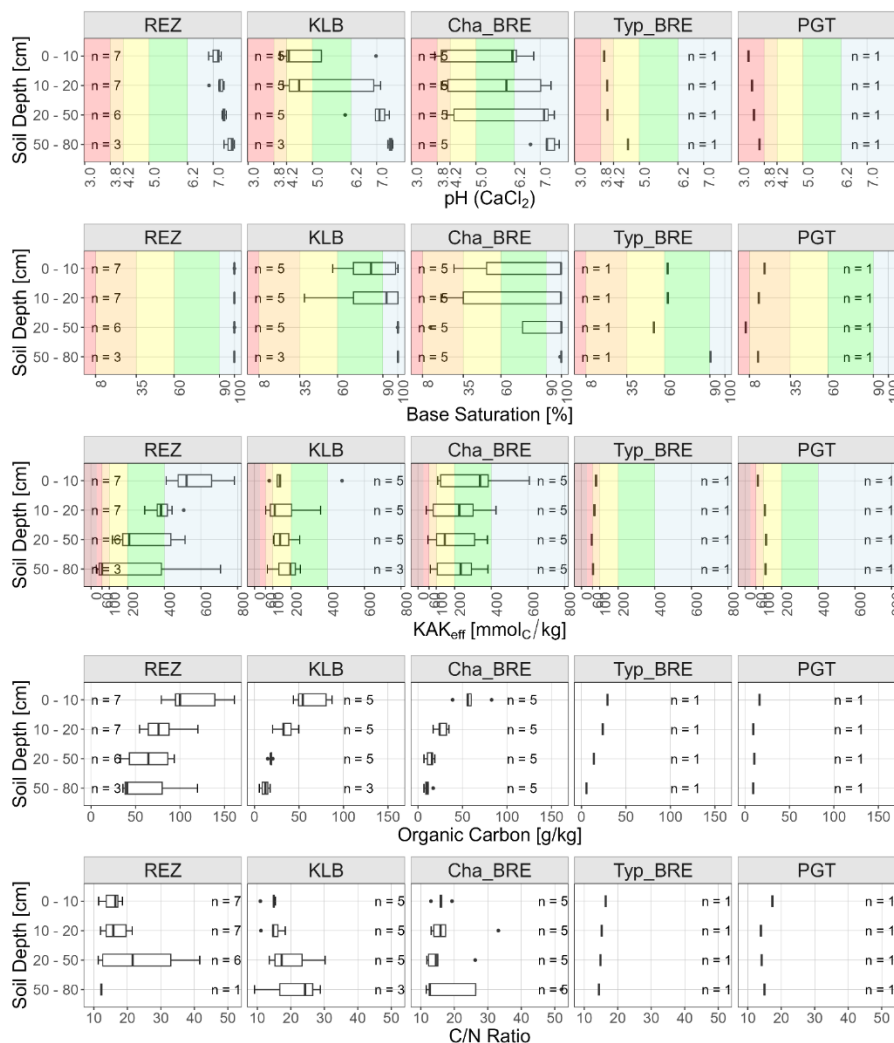
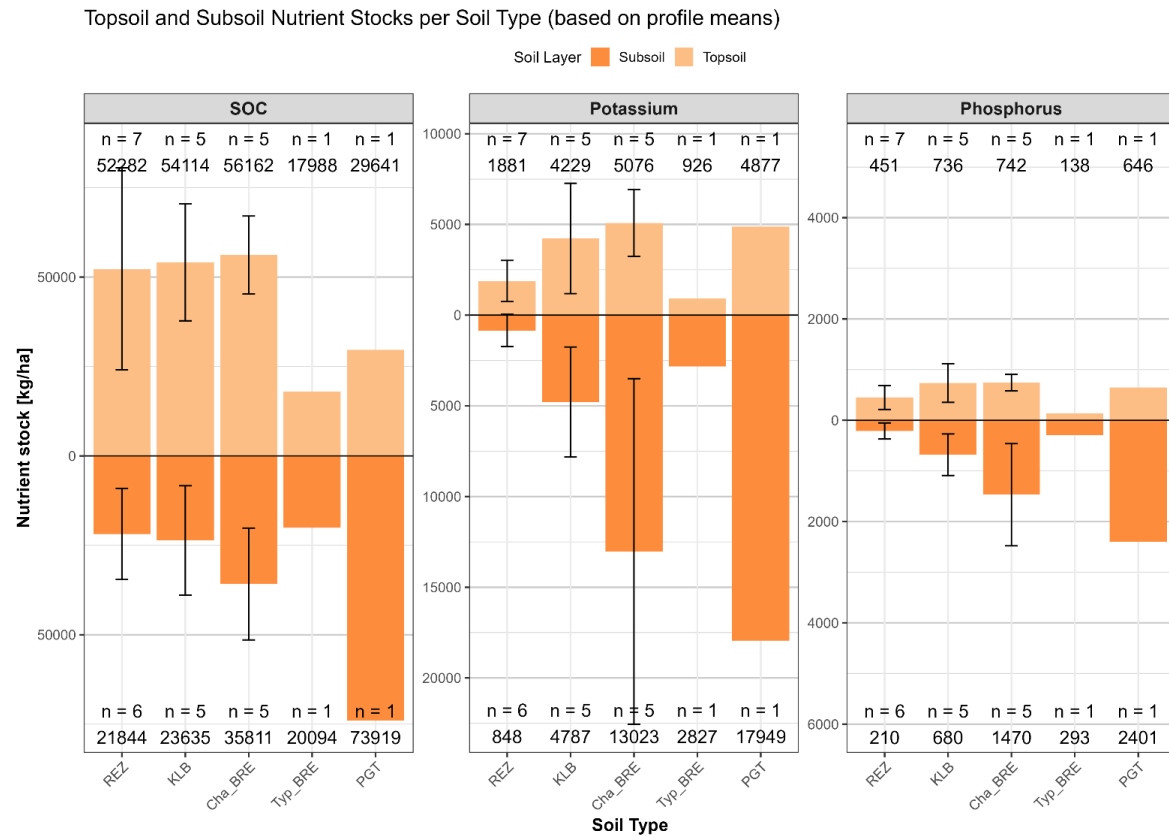


Abbildung 24 Vorräte an organischem Kohlenstoff (SOC), Kalium (Potassium) und Phosphor (Phosphorus) im Oberboden (0–20 cm) und Unterboden (20–80 cm) differenziert nach Bodentyp. Dargestellt sind Mittelwerte auf Profilbasis (kg/ha) mit Standardabweichung; n gibt die Anzahl der berücksichtigten Profil pro Bodentyp an.



Zukünftige Datenverwertungsmöglichkeiten

In Kombination mit topographischen und klimatischen Daten stellen die Daten der Standortserhebung und der Laboranalytik die Grundlage für weitere statistische Modellierungen dar. Zur Verdichtung der Beprobungspunkte werden die Rindbach-Profile daher in das Projekt FORSITE2 (dynamische Walddtypisierung) eingebunden. In Folgeprojekten ist zudem eine flächendeckende Charakterisierung der bodenchemischen und physikalischen Eigenschaften (beispielsweise Basensättigung, pH-Wert, Bodentextur) im MEZG-Rindbach möglich. Eine weitere Verwertungsmöglichkeit ist die Validierung von biogeochemischen Modellen wie LandscapeDNDC oder YASSO anhand des Datensatzes.

Zusammenfassung

Im Mai und Juni 2023 wurden an insgesamt 29 Standorten im MEZG-Rindbach Geländeerhebungen und Bodenprobenahmen durchgeführt. Die dabei gewonnenen Daten wurden sorgfältig dokumentiert und digitalisiert. Im Februar 2024 wurde ein vollständiger Datensatz zu physikochemischen Analysen erstellt, der eine detaillierte Auswertung der Bodenproben ermöglicht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Bodeneigenschaften in der Region stark heterogen sind. So wurde eine große Spannweite bei Parametern wie Bodenart, pH-Wert, organischem Kohlenstoff (C_{org}), Nährstoffgehalten und Schwermetallkonzentrationen festgestellt.

Die chemischen Merkmale und Nährstoffvorräte der Böden gliedern sich dabei deutlich nach den jeweiligen Bodentypen, was eine differenzierte Betrachtung der Bodenprofile erlaubt. Diese Daten bilden eine zentrale Grundlage für die forstliche Standortbewertung. In Kombination mit Informationen zur Topographie und zum Klima können sie zudem für statistische Modellierungen genutzt werden. Die flächendeckende Charakterisierung der bodenchemischen und physikalischen Eigenschaften, wie beispielsweise der Basensättigung, des pH-Werts und der Textur, ist somit im MEZG-Rindbach möglich.

AP 5.1: Allgemeine Landnutzung/Landbedeckung-Stoffkreislaufmodellierung

Franciele de Bastos, Hubert Hasenauer

Ziel dieses Arbeitspakets ist es, die wasserbezogenen Parameter für das MEZG-Rindbach mit Hilfe des Biome-BGC-Modells zu validieren und zu simulieren und den Wasserhaushalt sowie die Auswirkungen der Bestandsmerkmale auf die Wasserdynamik zu bewerten. Biome-BGC (Thornton 1998) simuliert in seiner Kalibrierung für österreichische Baumarten (siehe Pietsch et al. 2005) die Flüsse von Kohlenstoff, Stickstoff, Energie und Wasser über verschiedene Vegetationspools. Die Simulation beginnt mit einer Selbstinitialisierung, gefolgt von der eigentlichen Simulation, die historische und aktuelle Bewirtschaftungspraktiken einschließt.

BIOME-BGC Simulation

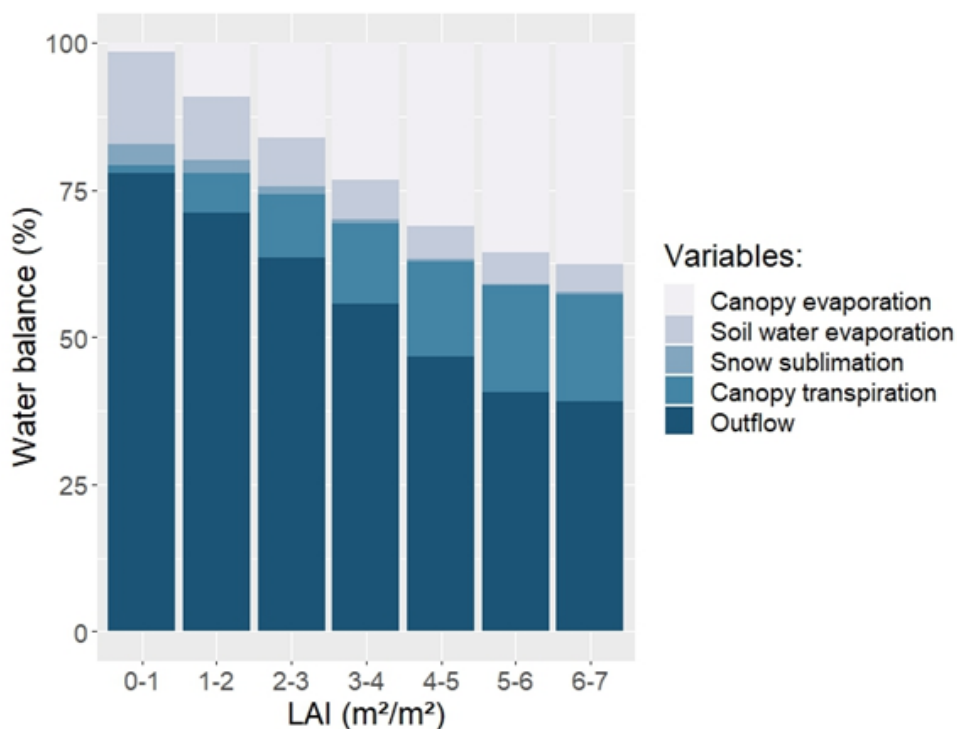
Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurden, basierend auf 31 Parzellen mit überwiegend (> 90 %) Fichtenbeständen (*Picea abies* (L.) Karst), BIOME-BGC Simulationen durchgeführt. Zu deren wichtigsten Eingabeparametern zählen Bodenmerkmale und Klimadaten. Die effektiven Bodeneigenschaften sowie Wurzeltiefe und Textur wurde dabei vom European Soil Data Centre (Panagos et al., 2012, 2022) für den Standort der simulierten Punkte bezogen. Die Klimadaten wurden mit DAYMET, ein für Österreich angepasstes und validiertes Klima-Interpolations- und Simulationstool, generiert. Damit konnten tägliche Klimadaten von 1960 bis 2022 für jeden simulierten Punkt aus 437 Klimastationen in Österreich interpoliert werden. Zusätzlich erforderte das Modell die Eingabe der historischen Landnutzung, definiert als fünf (je 100 Jahre) Rotationen mit Kahlschlag und anschließender Bepflanzung, sowie 25 und 75 Jahre Durchforstungsintervalle mit einer konstanten Durchforstungsintensität von 20%.

Für die Modellvalidierung wurde das vorhergesagte Volumen mit dem für das Gebiet beobachteten Volumen gemäß der von den Österreichischen Bundesforsten bereitgestellten Waldinventur verglichen. Da das Modell kein Bestandsvolumen als Ausgabe liefert, wurde der vorhergesagte Stammkohlenstoff mit Hilfe des Biomasse-Expansionsfaktors (Pietsch et al., 2005) in ein Bestandsvolumen umgerechnet. Das Modell Biome-BGC geht davon aus, dass alle simulierten Waldpunkte voll bestockt sind. Um den Wettbewerb im Bestand zu berücksichtigen, wurde der Kronenwettbewerbsfaktor pro Parzelle berechnet (Hasenauer

und Monserud, 1996), woraus sich das angepasste Volumen ergab. Die mittleren beobachteten und vorhergesagten Volumina betrugen 303,7 und 319,4 m³/ha, was darauf schließen lässt, dass Biome-BGC die Dynamik des Waldökosystems simulieren kann, einschließlich der Wasserdynamik im Kontinuum Boden-Pflanze-Atmosphäre.

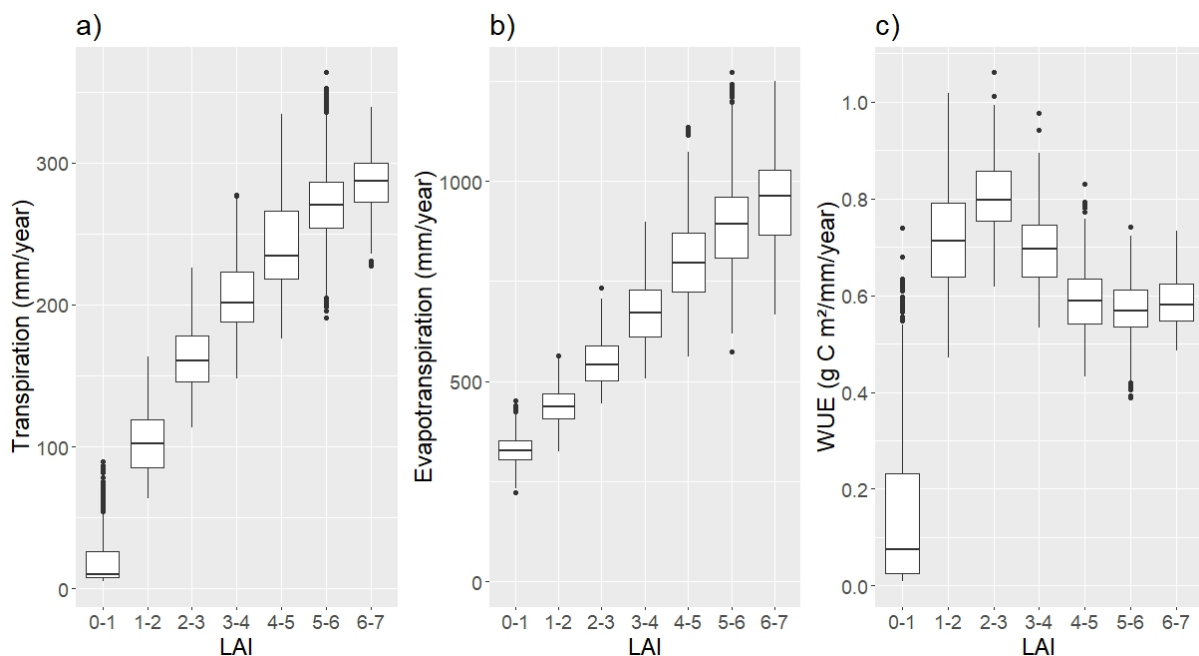
Um die wichtigsten Wasserflüsse in den Waldbeständen zu ermitteln, wurde die Wasserbilanz anhand der Ausgangsvariablen von Biome-BGC bewertet. Der aus der Simulation gewonnene LAI wurde zur Gruppierung verschiedener wasserbezogener Variablen aus den 31 Parzellen während eines Zeitraums von zwei Umtriebszeiten (1800 bis 2022) verwendet. Neben dem Niederschlag als Haupteintrag in das System wurden als Hauptwasserbilanz-Outputs die Verdunstung der Baumkronen, die Bodenwasserverdunstung, die Schneesublimation, die Transpiration der Baumkronen und der Abfluss berücksichtigt. Von allen bewerteten Parametern hatte der Abfluss den höchsten Anteil (39 bis 77 %) (Abbildung 25), wobei dieser von der niedrigeren zur höheren LAI-Gruppe abnahm.

Abbildung 25 Kumulierte Wasserbilanz der 31 simulierten Punkte für zwei Rotationen (1800 - 2022). Die Variablen, aus denen sich die Wasserbilanz zusammensetzt, sind Kronenverdunstung, Bodenwasserverdunstung, Schneesublimation, Kronentranspiration und Abfluss.



Die Variablen Verdunstung des Kronendachs, Transpiration und Wassernutzungseffizienz wurden ebenfalls nach den verschiedenen LAI-Gruppen bewertet, um die Auswirkungen der Bestandsmerkmale auf die Wasserparameter zu beurteilen. Die Variation der Transpiration zwischen den LAI war in den ersten Jahren des Bestandes deutlicher und nahm zwischen den LAI von 0 bis 4 $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ rasch zu (Abbildung 26a). Die Evapotranspiration stieg ebenfalls linear mit der Zunahme des LAI, deutlicher bei den LAI-Gruppen 4 bis 7 $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ (Abbildung 26b). Die Wassernutzungseffizienz (WUE) nahm von der LAI 0-1 bis 1-2 $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ rasch zu, wobei die höhere mittlere WUE in der Gruppe 2-3 $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ auftrat und später in den folgenden Gruppen abnahm (Abbildung 26c).

Abbildung 26 Variation der Pflanzentranspiration, der Evapotranspiration und der Wassernutzungseffizienz für verschiedene Blattflächenindexgruppen (LAI) in den 31 Parzellen von Rindbach für zwei Fruchtfolgen (1800 - 2022).



Zusammenfassung

Das Modell war in der Lage, die wasserbezogenen Parameter für das MEZG-Rindbach zu simulieren. Anhand der Wasserbilanz konnten die wichtigsten Wasserflüsse in den Waldbeständen ermittelt werden. Die Verteilung der Wasserbilanzkomponenten stand in engem Zusammenhang mit dem LAI, der in unserer Studie die Bestandesmerkmale darstellt. Ein höherer LAI bedeutet eine Verringerung des Abflusses aufgrund höherer Transpiration und

Evapotranspiration, was auf die Fähigkeit dieser Bestände hindeutet, die Auswirkungen extremer Niederschlagsereignisse zu kontrollieren. Für Bewirtschaftungsvorschläge kann der LAI mit routinemäßigen Waldbestandsinformationen in Beziehung gesetzt werden.

AP 5.2: Allgemeine Landnutzung/Landbedeckung-Erschließung

Franz Holzleitner, Elias Amerhauser

Forststraßen sind unbestritten einer der wichtigsten kostenrelevanten Erfolgsfaktoren für eine nachhaltige und effiziente Bewirtschaftung unserer Wälder in Österreich. Sie stellen die zentrale Schlüsselinfrastruktur hierfür dar, weshalb es notwendig ist, ihren Zustand, ihre Befahrbarkeit unter verschiedensten Bedingungen sowie ihr Abflussverhalten und deren Auswirkungen auf den Wald zu berücksichtigen. Dies beginnt bereits bei der Planung und reicht bis zur regelmäßigen Instandhaltung des gesamten Netzwerks. Nur ein anforderungsgerecht gebautes und ausreichend instand gehaltenes Netz von Forststraßen kann den Ansprüchen der verschiedenen Nutzer gerecht werden und eine effiziente Waldbewirtschaftung ermöglichen.

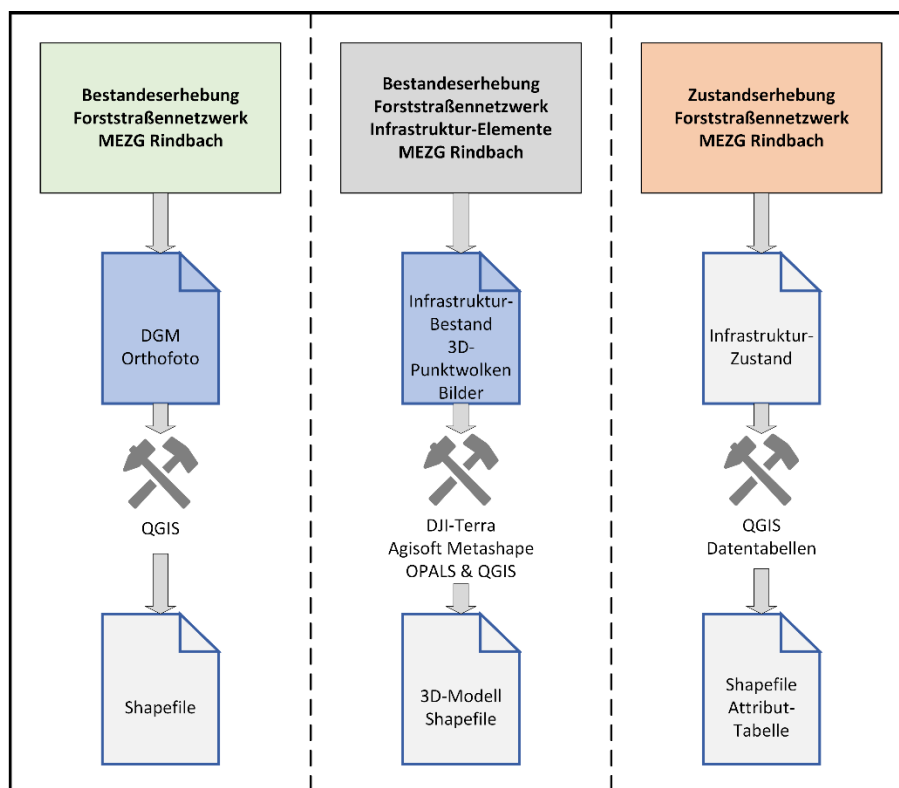
Witterungsbedingte Einschränkungen bei der Befahrung von Forststraßen sind in Österreich jedoch je nach Untergrund und Aufbau an der Tagesordnung. Besonders während der Tauperioden im Frühjahr oder nach intensiven Niederschlagsereignissen treten Probleme zutage. Wassergesättigte Straßenkörper halten einer Belastung durch Transportfahrzeuge nicht stand, da ihnen die nötige Tragfähigkeit fehlt. Dies hätte unweigerlich eine kostenintensive Instandsetzung der Forststraßen zur Folge. Aus Kostengründen werden die betroffenen Straßenzüge daher oft kurzerhand für den Holztransport gesperrt. Das hat jedoch weitreichende Auswirkungen auf die gesamte Holzbereitstellungskette.

Ein digitales Abbild des betreffenden Forststraßennetzes könnte allen Beteiligten hilfreiche Informationen für die Nutzung dieser Infrastruktur bereitstellen. Einerseits können detaillierte Informationen zur Befahrbarkeit erfasst und bereitgestellt werden, andererseits können auf dieser Grundlage sofort notwendige Sanierungs- und Instandhaltungsmaßnahmen abgeschätzt und kalkuliert werden. Darüber hinaus können Schwachstellen bei der Dimensionierung und Bauausführung bestehender Forststraßen ermittelt und dokumentiert werden. Diese Informationen können dann die Grundlage für eine Gefahrenbeurteilung sowie für die Dokumentation der einzuleitenden Maßnahmen bilden.

Das Ziel dieser Arbeit besteht daher darin, ein digitales Abbild des für LKW befahrbaren Forststraßennetzes im MEZG-Rindbach zu erstellen. Dieses soll in weiterer Folge die Grundlage für weiterführende Analysen bilden. Im Rahmen des Arbeitspakets 5.2 „Erschließung“ wurde der Bestand und Zustand des für LKW befahrbaren Forststraßennetzes im MEZG-Rindbach daher erfasst und dokumentiert.

Der Fokus lag hierbei auf der Bestands- und Zustandserhebung der im MEZG errichteten Forststraßen. Zunächst wurden die Forststraßen auf Basis der vorliegenden Geodaten aus-
geschieden und hinsichtlich der Längsneigungen klassifiziert. Vor Ort wurden dann die Lage,
Bauart, das Material, die Dimensionen und die Gebrauchstauglichkeit der Durchlässe ein-
schließlich der Gestaltung der Ein- und Ausläufe erfasst. Gleichzeitig wurde die Tragfähigkeit
des Straßenkörpers bei unterschiedlichem Wassergehalt erfasst und analysiert. Darüber
hinaus wurde die Ausgestaltung des Querschnitts mitsamt den berg- und talseitigen Bö-
schungen sowie dem Zustand der Fahrbahn und der Längsentwässerung dokumentiert (Ab-
bildung 27).

Abbildung 27 Ziel und Ablauf der Arbeiten im AP 5.2



Feldaufnahmen

Die Erhebungen waren für das gesamte 2.350 ha große Einzugsgebiet geplant und orientierten sich in ihren Grundzügen an der Masterarbeit von (Riegler, 2019) sowie an den Arbeiten von Schönauer et al. (2019). Sie basierten auf einem zuvor erarbeiteten und adaptierten Aufnahmeschlüssel. Der erste Testlauf für die Datenerhebung im MEZG fand am 1.

und 2. Juni 2023 auf ausgewählten Straßenabschnitten im MEZG statt. Ziel war es, das Datenerhebungskonzept zu erproben und dessen Anwendbarkeit im gesamten Einzugsgebiet zu testen, um gegebenenfalls Anpassungen vornehmen zu können. Der Schwerpunkt lag dabei auf den Tragfähigkeitsmessungen sowie den Erhebungen zu den Durchlässen einschließlich ihres Zustands, der Fahrbahnbreite und der Funktionstauglichkeit der Längsentwässerung.

Zur Verortung der Durchlässe kam ein Leica GS18 GNSS-RTK-Rover in Kombination mit einem Leica CS20 Feld-Controller und einer Leica Captivate RTK-Einheit zum Einsatz. Parallel dazu wurden auch der Durchmesser, die Bauart, die Gestaltung der Ein- und Ausläufe sowie die Funktionstüchtigkeit erfasst. Gleichzeitig wurde die Neigung der Durchlässe mit dem Haglöf Vertex Laser Geo 360° erfasst und die Länge mit dem Maßband dokumentiert (Tabelle 5). Über die Bild-ID können die erfassten Parameter anhand von Bildern, die die visuelle Ansprache der Ein- und Ausläufe zeigen, nachträglich eindeutig zugeordnet und kontrolliert werden (Abbildung 28).

Tabelle 5 Datenerhebungskonzept für die Bestandes- und Zustandserhebung des LKW-befahrbaren Forststraßennetzes im MEZG-Rindbach

Element	Parameter	Einheit	Ausprägung/Zustand
Durchlass	Position	Lon/Lat	
	Durchmesser	cm	
	Länge	m	
	Neigung	%	
	Funktionstauglichkeit		voll, beschränkt oder nicht funktionsfähig
	Bauart		Stahl, Beton, Wellblech
	Ein- und Auslauf		gesichert, ungesichert
Fahrbahn	Tragfähigkeit	Evd (MN/m ²), Position (Lon/Lat)	
	Fahrbahnbreite	m	
	Profilgestaltung	Position (Lon/Lat)	Bombierung, Dachprofil, talwärts hängend, bergwärts geneigt
	Wasserabfluss auf der Straße	Position (Lon/Lat)	ja/nein

Element	Parameter	Einheit	Ausprägung/Zustand
	Optischer Gesamteindruck	Position (Lon/Lat)	gut, durchschnittlich, schlecht
	Bewuchs auf der Fahrbahn	%-Stufen Abdeckung der Fläche	0, 5, 10, 15, 20
Längsentwässerung	Bauart	Position (Lon/Lat)	Trapezgraben, Dreiecksgraben oder Abzugskante
	Funktionstauglichkeit	Position (Lon/Lat)	voll, beschränkt oder nicht funktionsfähig

Abbildung 28 Erfassung eines Rohrdurchlasses mit Leica GS18 GNSS-RTK-Rover in Kombination mit dem Leica CS20 Feld-Controller und Leica Captivate (RTK-Einheit)



Je nach Steifigkeit des Forststraßenkörpers wurden die Tragfähigkeitsmessungen mit dem leichten (10 kg für den Messbereich von 15–70 MN/m² Evd) oder dem mittelschweren

(15 kg für den Messbereich von 30–150 MN/m² Evd) Fallgewichtsgerät des Herstellers TERRATEST durchgeführt. Dabei kam das Produkt TERRATEST 6000 BLE zum Einsatz. Gemessen wurde auf beiden Fahrspuren, berg- und talseitig. Der Punktabstand für die Tragfähigkeitsmessungen wurde auf 200 m festgelegt und mittels Tachometer vom Fahrzeug aus geschätzt. Jeder Messpunkt wurde dabei über das integrierte GPS-Modul der Messeinheit automatisch mit Koordinaten (Lon/Lat) dokumentiert. Zudem wurde in jedem Punkt die Fahrbahnbreite gemessen (Abbildung 29). Um nachfolgende Messungen im gleichen Abschnitt durchführen zu können, wurden die Messpunkte an der Seite der Forststraße mit Forstspray markiert.

Abbildung 29 TERRATEST 6000 BLE im Einsatz mit dem mittelschweren Fallgewicht (15 kg) im Abstand von 200 m und Erfassen der Fahrbahnbreite im gleichen Punkt



Zur Dokumentation der Längsentwässerung wurde nicht nur an einzelnen Punkten die Ansprache durchgeführt, auch der Zustand wurde über deren gesamte Länge mittels Punkt-ID von der RTK-Einheit protokolliert (Abbildung 30). Während dieser ersten Messreihe konnte das Aufnahmekonzept erprobt und größtenteils umgesetzt werden.

Abbildung 30 Beispiel für die Dokumentation der Gestaltung und Zustand der Längsentwässerung entlang der erhobenen Straßenabschnitte



Drohnenbefliegungen mit Laserscanner

Des Weiteren wurden in ausgewählten Abschnitten von Forststraßen auch Erhebungen mit einer DJI Matrice 300 RTK und einem ZENMUSE L1-Laserscanner mit einer Punktdichte von über 500 Punkten pro Quadratmeter durchgeführt. Im Zuge dieser Befliegungen der Forststraßenkorridore wurden aufgrund der vorherrschenden Geländebedingungen auch unterschiedliche Flugmuster getestet. Zum einen wurde über der Straße ein vordefiniertes Gittermuster abgeflogen. Zum Vergleich erfolgte eine Aufnahme im Nadir mit einer Wegpunktmission. Es zeigte sich, dass letzteres eine höhere Flächenleistung bei guter Abbildung der Fahrbahneigenschaften lieferte, während das Gittermuster zur besseren Abdeckung der Hänge beitrug. In (Abbildung 31) ist die Drohne beim Startvorgang über der Forststraße zu sehen.

Abbildung 31 Drohne beim Aufsteigen über der Forststraße mit montiertem Laserscanner



Photogrammetrische Aufnahmen

Zusätzlich erfolgte eine photogrammetrische Erhebung des Großteils des Forststraßennetzes im MEZG-Rindbach. Hierbei wurden die betreffenden Abschnitte mithilfe von zwei am Heck eines VW-Busses montierten Action-Kameras (GoPro HERO7 Black) kontinuierlich im zeitlichen Abstand von 0,5 Sekunden kontinuierlich erfasst. Die Kameras waren in der Mitte des Fahrzeugs mit zwei unterschiedlichen Blickwinkeln (ca. 5 bzw. 55 Grad) auf die Straße ausgerichtet und befanden sich in einer Höhe von 185 cm über Grund. Während der Aufnahmen wurde der ISO-Wert auf den Bereich zwischen 800 und 1.600 festgelegt, der Weißabgleich auf 6.000 Kelvin fixiert und keine Belichtungskorrektur vorgenommen. Die Linse wurde auf lineares Sichtfeld eingestellt. Während der Aufnahmen wurde versucht, eine gleichmäßige Geschwindigkeit von 10 km/h mit dem VW-Bus zu halten (Abbildung 32).

Abbildung 32 Montierte Action-Kameras am Heck des VW-Busses für die photogrammetrische Erfassung der Forststraße



Zur Skalierung der verarbeiteten Bilder wurden vor den Aufnahmen auf der Forststraße spezielle Marker fixiert. Mithilfe dieser Marker konnten anschließend die Analysearbeiten mit der Structure-from-Motion-Technik und der Spezialsoftware „Agisoft Metashape“ durchgeführt werden. Zum Verschneiden mit den vorhandenen Geodaten und für die anschließende Zuordnung wurde die Lage von mindestens einem Marker auf einem Anfangs- oder Endpunkt eines Forststraßenabschnitts vermessen (Abbildung 33).

Abbildung 33 Aufgelegter und fixierter Marker für die spätere Weiterverarbeitung der Bilder in der Spezialsoftware Agisoft Metashape inklusive Vermessung der Lage des Markers



Bestandeserhebung basierend auf Geodaten

Parallel zu den Aufnahmen vor Ort wurde das gesamte Forststraßennetz im MEZG auf Basis der Geodaten aus der Befliegung von 2021 digitalisiert. Grundlage hierfür waren das Orthofoto mit einer Auflösung von 10 cm pro Pixel und das digitale Geländemodell mit einer Auflösung von 50 cm. In einem ersten Schritt wurden die Straßenränder mit dem Polygon-Tool in QGIS 3.28 (QGIS Association, 2025) digitalisiert. Dabei diente das Orthofoto in erster Linie zur visuellen Festlegung der Straßenränder. In Bereichen, in denen die Forststraße durch Bewuchs überdeckt war, wurde zur Festlegung des Straßenverlaufs das digitale Geländemodell herangezogen (Abbildung 34 und Abbildung 35).

Abbildung 34 Beispiel für einen digitalisierten Forststraßenabschnitt (rosa eingefärbt) mit dem verfügbaren Orthofoto im Hintergrund als Grundlage für die Festlegung des Polygons

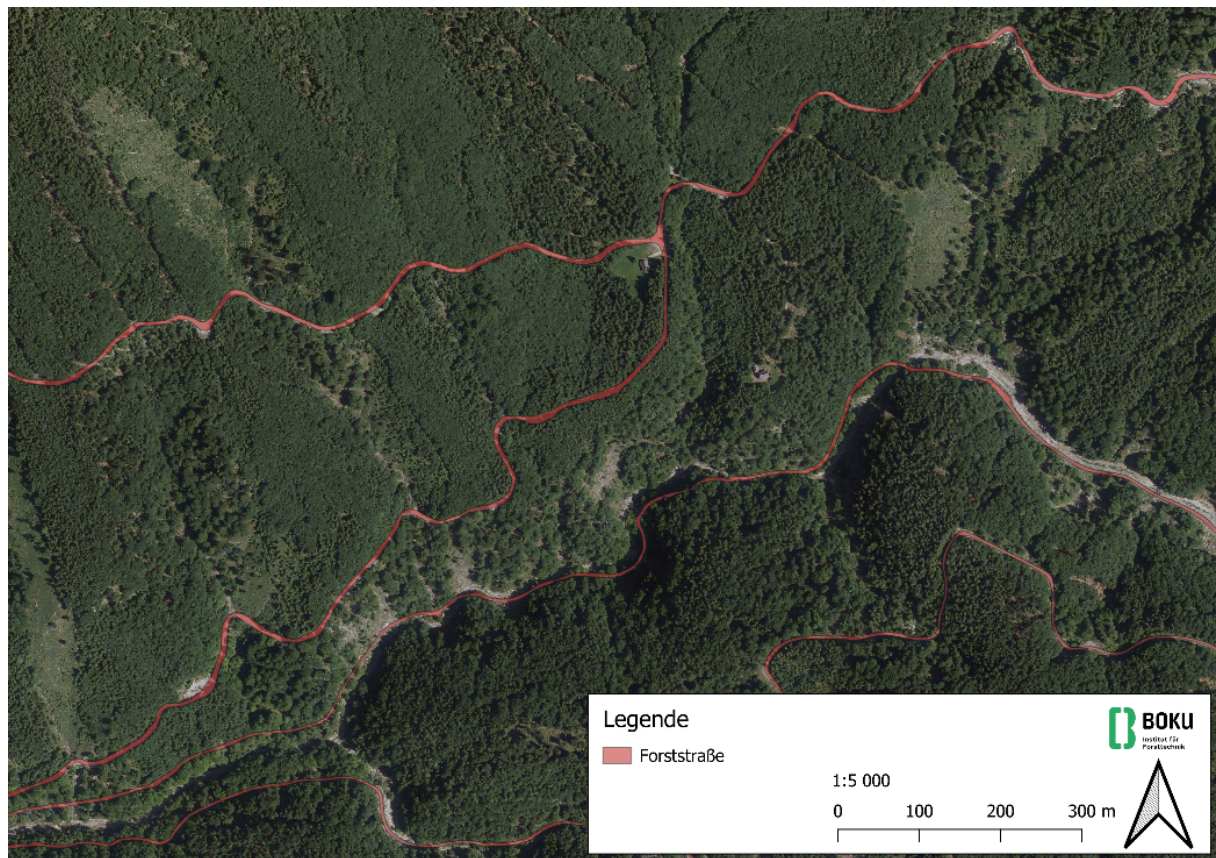
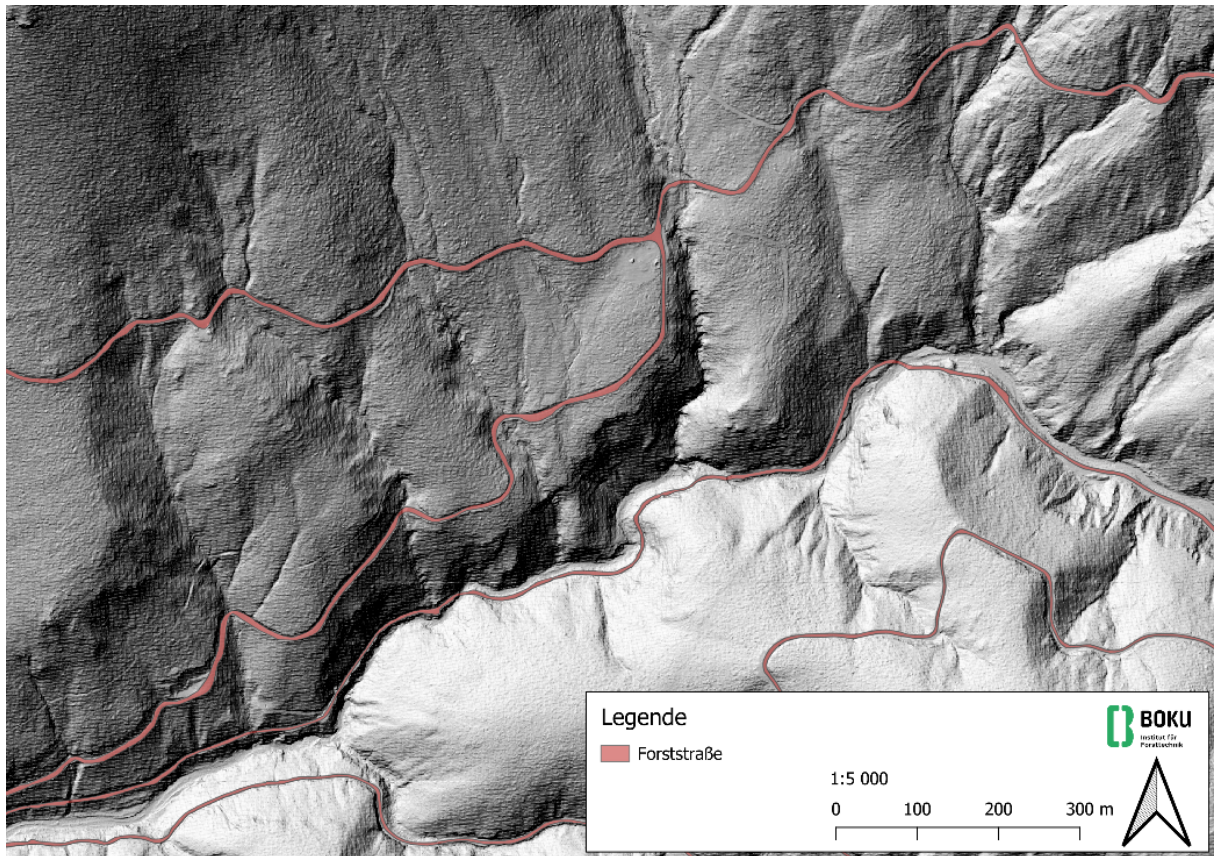


Abbildung 35 Beispiel für einen digitalisierten Forststraßenabschnitt (rosa eingefärbt) mit dem verfügbaren DGM im Hintergrund als Grundlage für die Festlegung des Polygons



Des Weiteren wurden mithilfe eines Python-Skripts zur Analyse der Geometrie des Straßenkörpers Querprofile entlang der Straßenachse in Kombination mit dem bereits vorliegenden DGM generiert. Dazu werden die Segmentgeometrien auf 2D-Einzellinien bereinigt und in der Segmentmitte jeweils rechtwinklige Querlinien (± 12 m) konstruiert. Diese Querlinien werden ins DGM-Koordinatensystem transformiert und auf die Ausdehnung des DGM zugeschnitten, sodass nur innerhalb des Höhenrasters geschnitten wird. Entlang jeder Querlinie werden dann alle 0,5 m Punkte berechnet und die Höhenwerte direkt aus dem DGM ausgelesen. Die Ausgabe der Daten jedes einzelnen Querprofils erfolgt als CSV-Datei. Die Daten sind über die Querprofil-ID eindeutig zuordenbar und beinhalten Informationen zum Querabstand relativ zur Profilmitte und zur Höhe.

Auf Basis des Linienlayers der digitalisierten Straßenachse wurde mittels weiteren Python-Skripts zudem die horizontale Linienführung hinsichtlich der Kurven- und Kehrenradien analysiert. Hierzu wurde der Layer in durchgehende Achssegmente anhand fixer Abstände mit Punkten eingeteilt. Mittels der 3-Punkt-Methode wurden anhand dieser Punkte die Krüm-

mungsradien und die Krümmungsrichtung berechnet. Punkte mit annähernd gleichem Radius und gleicher Richtung wurden zu Kurvenabschnitten zusammengefasst, Doppelkurven hingegen wurden getrennt. Für jede Kurve bzw. Kehre wurden neben dem minimalen Radius auch der Median und die Perzentile ermittelt, sodass enge Kehren ebenso wie langgezogene Bögen verlässlich erfasst werden konnten. Somit wurde dem Linienlayer der Straßenachse ein zusätzlicher Kurvenlayer mit den Details der horizontalen Linienführung hinzugefügt.

Einfluss von Forststraßen auf die Abflusssdynamik

Im Rahmen der Masterarbeit von Amerhauser, E. (2025) wurde untersucht, wie sich Forststraßen in unterschiedlichen Zuständen auf die Abflusssdynamik im MEZG-Rindbach auswirken. Dazu wurden drei Szenarien modelliert:

- Naturzustand ohne Forststraßen,
- Optimal-Zustand mit vollständig funktionsfähiger Längs- und Querentwässerung und
- Ist-Zustand mit den aus den Felderhebungen beobachteten Defiziten.

Das konzeptionelle Niederschlags-Abfluss-Modell NASIM der Firma Hydrotec verwendet in QGIS aufbereitete Geodaten. Die Forststraßen wurden im Modell als eigene Teileinzugsgebiete ausgeschieden, welche auf dem GIS-Layer des Operats der ÖBF-AG basieren. Die Lage der Querentwässerungen teilen diesen wiederum in hydraulisch wirksame Einheiten (Abbildung 36, Abbildung 37 und Abbildung 38).

Zur Bewertung dienen der Scheitelabfluss ($Q_{\max}$) [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$], die Zeit bis zum Scheitel (t_{peak}) [h], das Gesamtabflussvolumen (V) [m^3], die Zeit bis zum 10- und 90% -Scheitelabfluss (t_{10} und t_{90}) [h], die Anstiegsgeschwindigkeit (r_{10-90}) [$\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{h}^{-1}$], das Rückgangsgefälle (r_{rec}) [$\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{h}^{-1}$], der Fließzeitschwerpunkt (t_{centroid}) [h], der Flashiness-Index (RBI), sowie die 5 %- und 95 %-Percentile (Q_5 und Q_{95}) [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$]. Der Fokus liegt auf dem unkalibrierten Szenarienvergleich.

Als Referenz für die Modellergebnisse wurde ein einziges, synthetisches Bemessungseignis verwendet, dessen meteorologische Kenngrößen sich am dokumentierten Hochwasser vom 2. Juni 2013 orientieren. Alle Simulationen wurden mit identischen Parametereinstellungen durchgeführt, um die Vergleichbarkeit sicherzustellen. Der Niederschlagsantrieb bestand aus einem 12-stündigen Bemessungsregen mit einer Wiederkehrzeit von 10 Jahren ($D = 12 \text{ h}$, $T = 10 \text{ a}$) und einer Gesamtniederschlagshöhe von 118 mm, abgeleitet aus den vom Hydrographischen Dienst Österreich bereitgestellten Datensätzen für das Jahr 2020

(BMLRT, 2025). Grundlage der Ableitung war der Gitterpunkt 3590 im eHYD der die klimatischen Bedingungen im Modellgebiet repräsentativ abbildet.

Abbildung 36 Übersicht zu den abgegrenzten Teileinzugsgebieten für die Simulation im Rahmen der Masterarbeit von Amerhauser (2025)

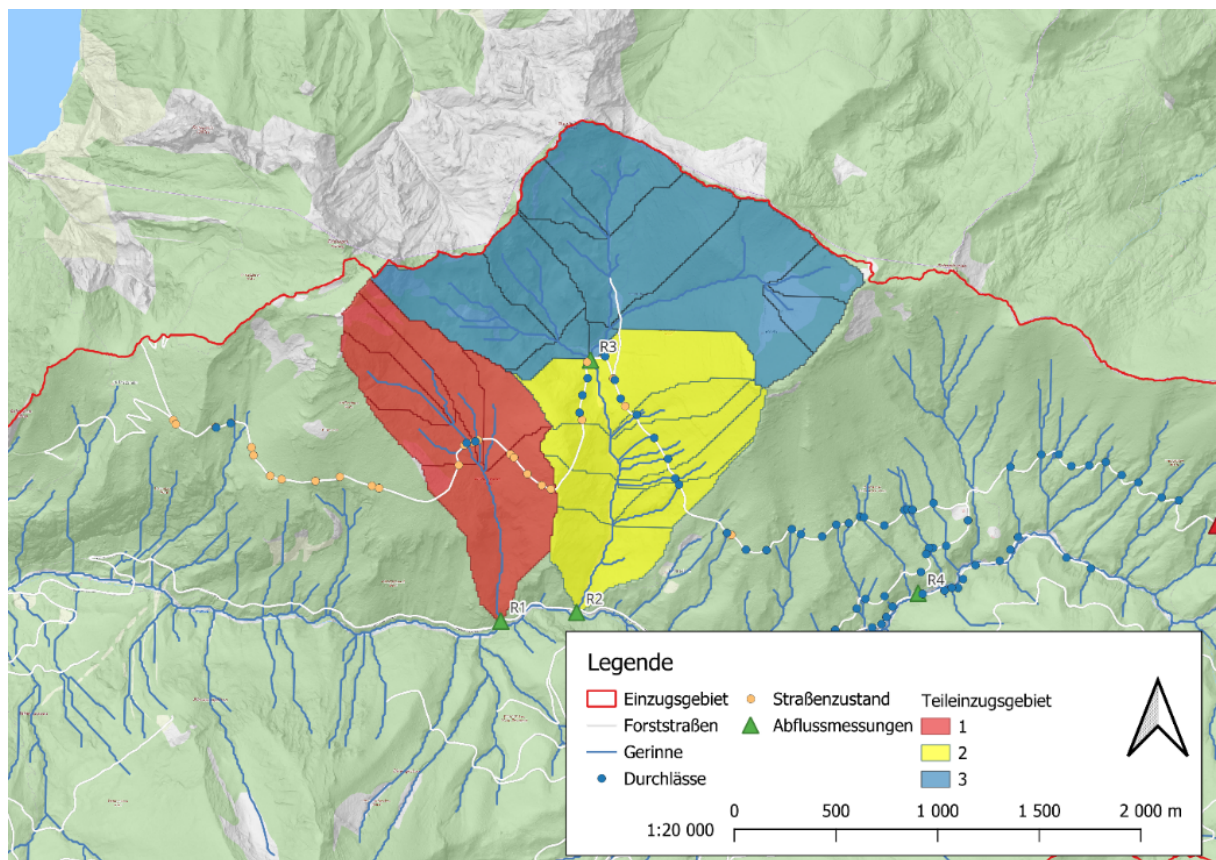


Abbildung 37 Übersicht zum abgegrenzten Teileinzugsgebiet TG1 für die Simulation im Rahmen der Masterarbeit von Amerhauser (2025) im Detail

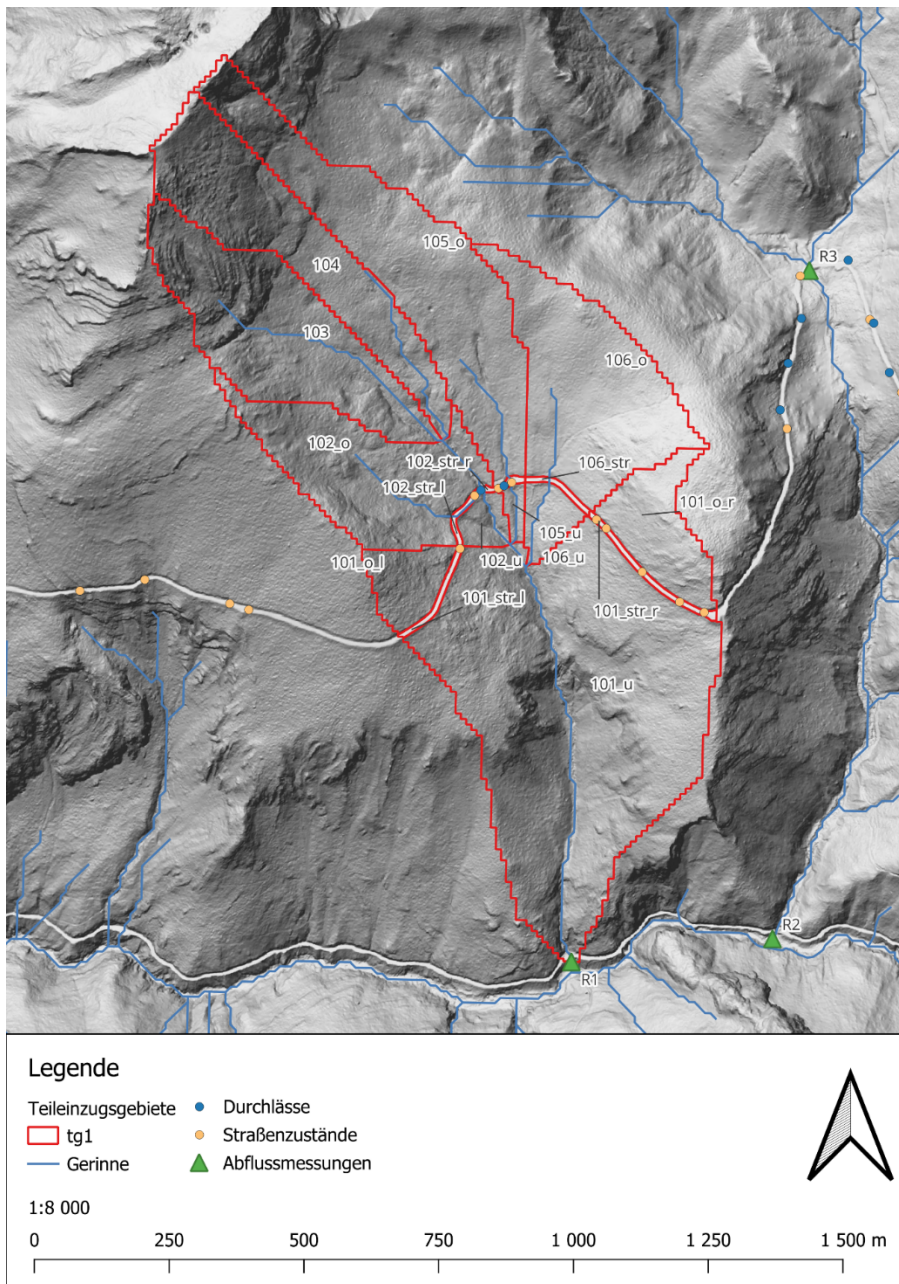
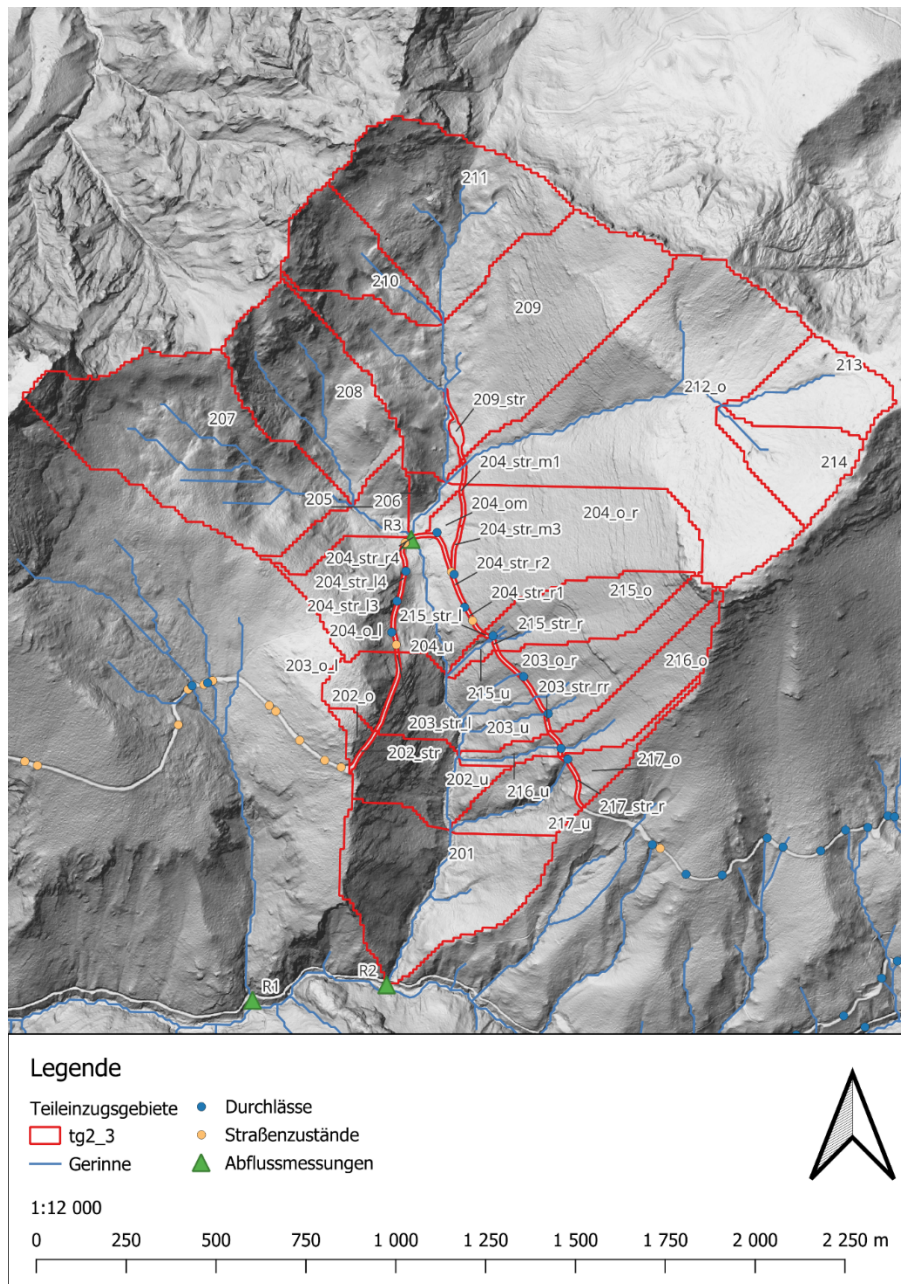


Abbildung 38 Übersicht zum abgegrenzten Teileinzugsgebiet TG2_3 für die Simulation im Rahmen der Masterarbeit von Amerhauser (2025) im Detail



Datenauswertung

Im Rahmen der Felderhebungen konnten nicht alle Parameter zum Forststraßennetzwerk im gesamten MEZG-Rindbach erhoben werden. Die Querentwässerung wurde für den gesamten Nordteil erfasst. Die Tragfähigkeit wurde für den Großteil des MEZG erhoben. Die Beurteilung des Fahrbahnzustands einschließlich der Funktionstauglichkeit der Längsentwässerung, des Wasserabflusses auf der Fahrbahn und der Ausprägung des Querprofils ist

im Norden des MEZG auf einem Teilabschnitt mit 5,9 km Länge durch detaillierte Erhebungen abgedeckt. Zusätzlich wurde ein Großteil des Straßennetzes noch photogrammetrisch erfasst.

Tragfähigkeit des Forststraßenkörpers

Zur Dokumentation des Zustands des Forststraßenkörpers bei den Tragfähigkeitsmessungen – trocken oder nass – wurde während der Messkampagnen auf die installierten Wetterstationen hinsichtlich Niederschlags, Temperaturverlauf und Luftfeuchtigkeit im MEZG zugegriffen. Die Messungen erstreckten sich jeweils über mehrere Tage und Abschnitte (Abbildung 39 und Abbildung 40). In Summe wurden im „trockenen“ 158 und im „nassen“ Zustand 186 Punkte erfasst (Abbildung 41 und Abbildung 42).

Abbildung 39 Niederschlag, Temperaturverlauf und relative Luftfeuchtigkeit vor den Messungen im „trockenen“ Zustand

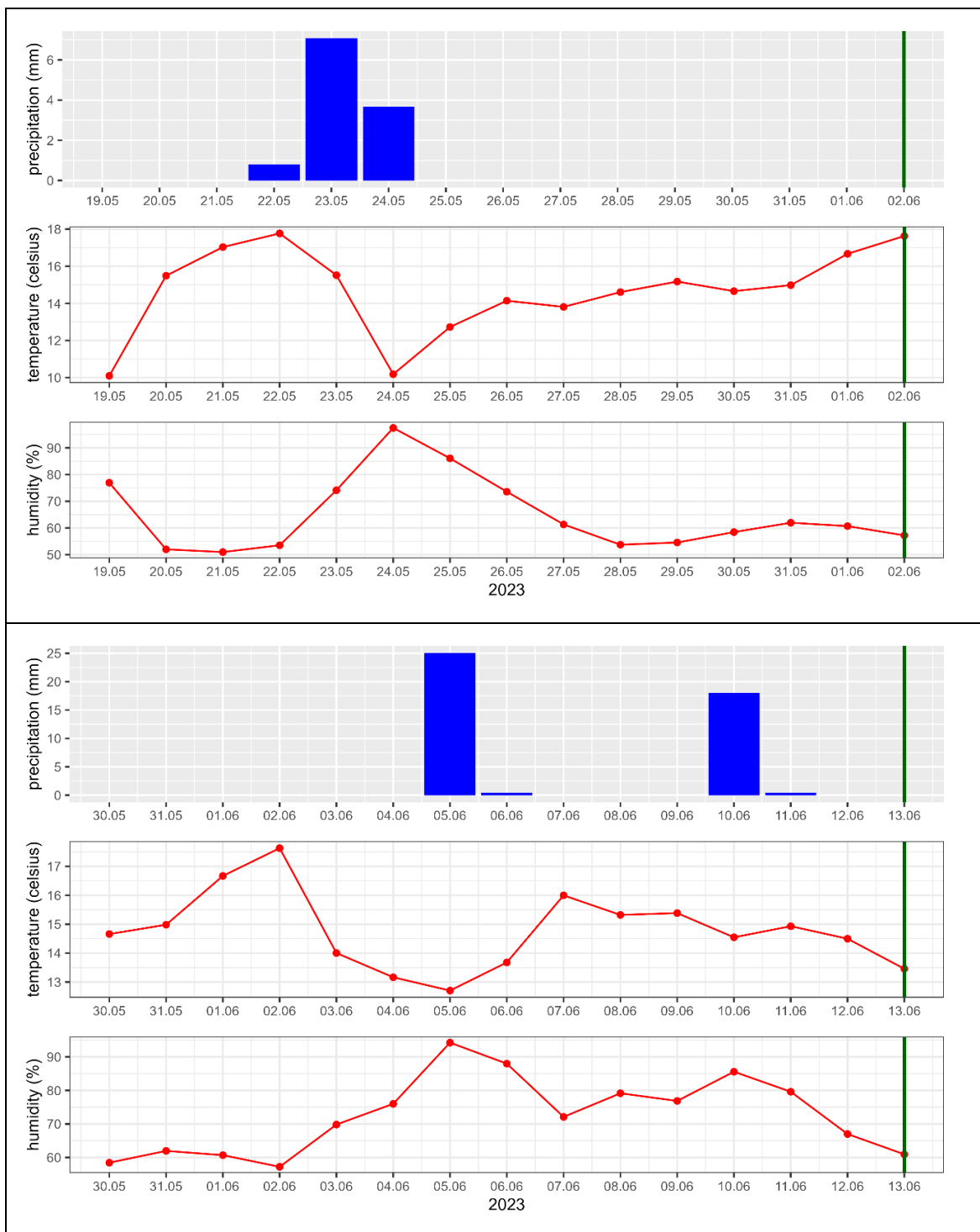


Abbildung 40 Niederschlag, Temperaturverlauf und relative Luftfeuchtigkeit vor den Messungen im „nassen“ Zustand

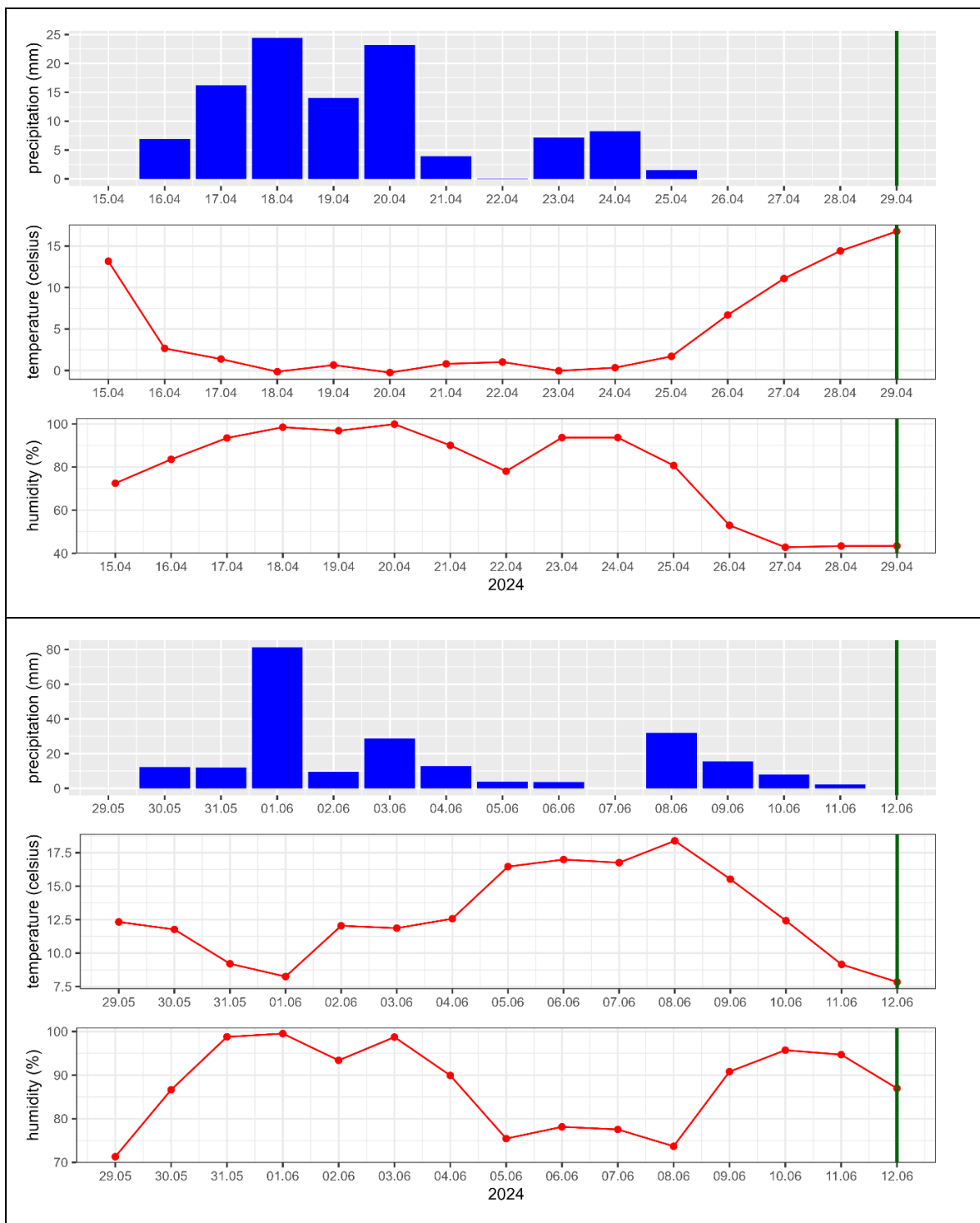


Abbildung 41 Tragfähigkeitsmessungen im „trockenen“ Zustand des Straßenkörpers für das Forststraßennetz im Großteil des MEZG

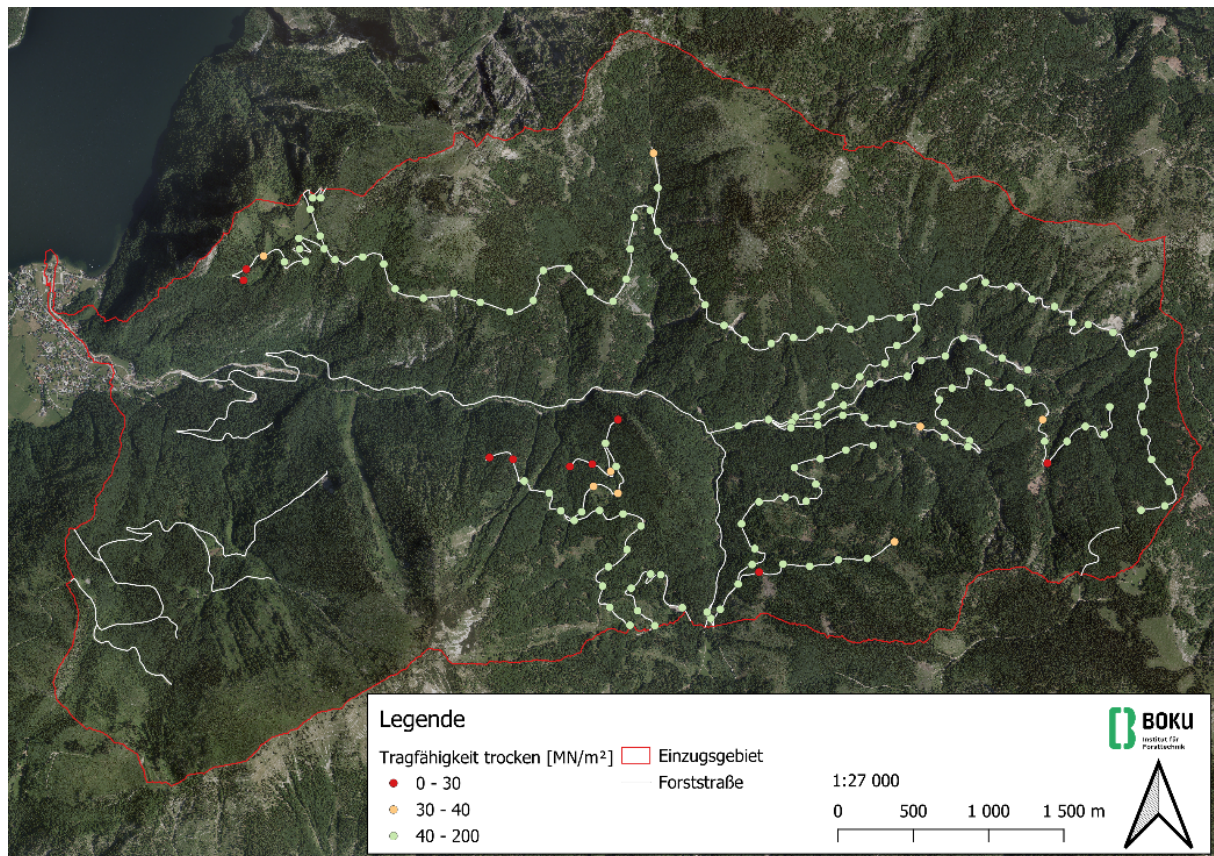
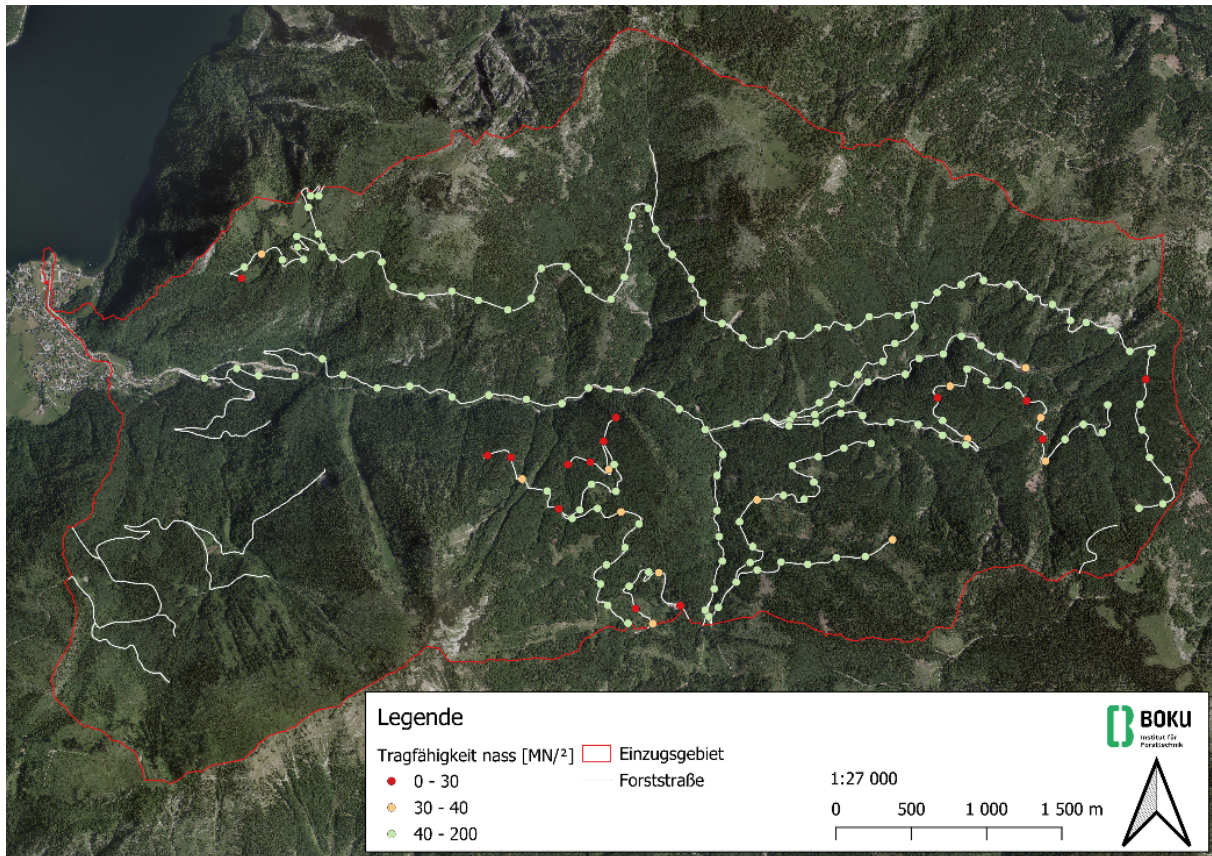


Abbildung 42 Tragfähigkeitsmessungen im „nassen“ Zustand des Straßenkörpers für das Forststraßennetz im Großteil des MEZG



Im trockenen Zustand weisen nur wenige Messpunkte einen Wert unter 40 bzw. 30 MN/m^2 auf. Zur Veranschaulichung wurde für den geringsten Messwert von jedem Datenpaar (bergseitig und talseitig) eine eigene Grafik erstellt. Im Kalk zeigt sich jedoch, dass die Tragfähigkeit selbst bei durchnässtem Straßenkörper zwar absinkt, aber immer noch das erforderliche Niveau für eine schadlose Befahrung beibehält (Tabelle 6, Abbildung 43, Abbildung 44 und Abbildung 45).

Tabelle 6 Deskriptive Statistik zu den Tragfähigkeitsmessungen bei unterschiedlichem Wassergehalt des Straßenkörpers

Tragfähigkeit (Evd (MN/m ²))	trocken		nass	
	talseitig	bergseitig	talseitig	bergseitig
Anzahl Messwerte	158	158	186	186
Mittelwert	90,9	88,6	72,7	73,9
Maximum	185,2	183,7	226,1	201,8
Minimum	8,7	9,4	7,7	12,8
Standardabweichung	38,7	38,2	28,4	30,7

Abbildung 43 Boxplots zu den Tragfähigkeitsmessungen im „trockenen“ Zustand des Straßenkörpers für einen Teil des Forststraßennetzes im Nordwesten des MEZG

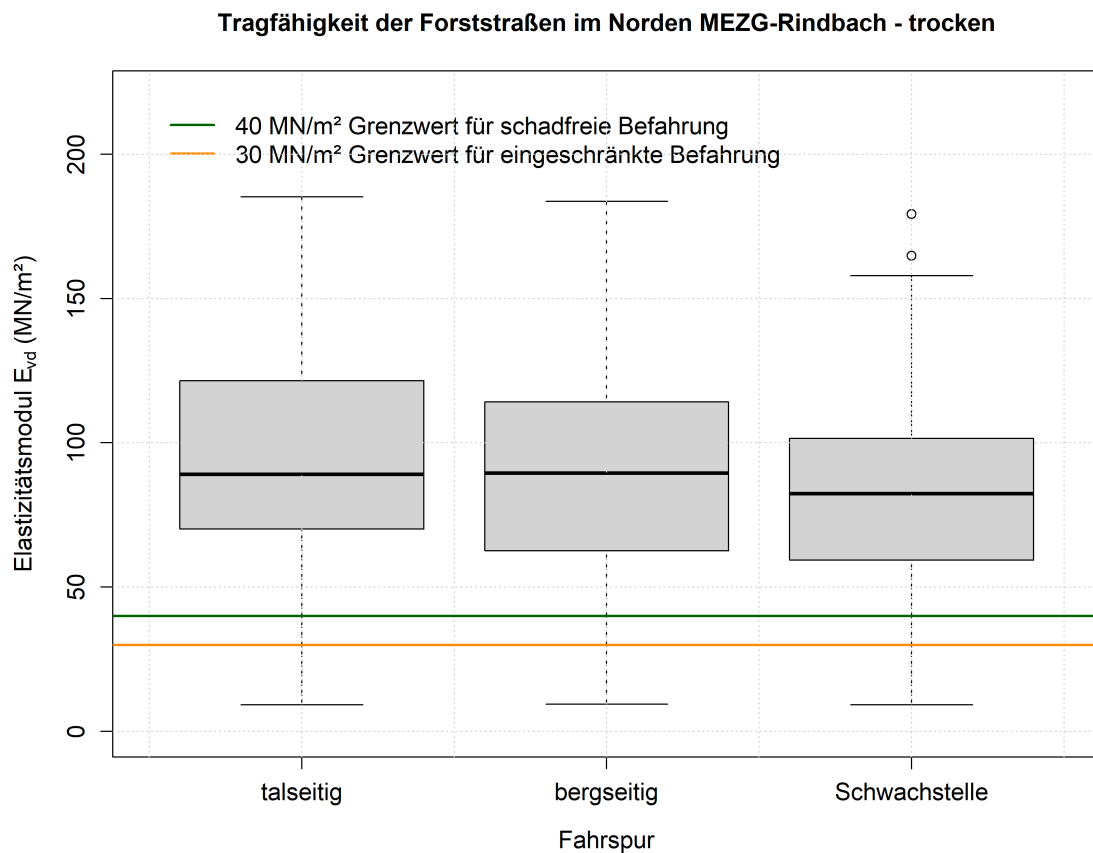


Abbildung 44 Boxplots zu den Tragfähigkeitsmessungen im „trockenen“ Zustand des Straßenkörpers für das Forststraßennetze im Großteil des MEZG-Rindbach

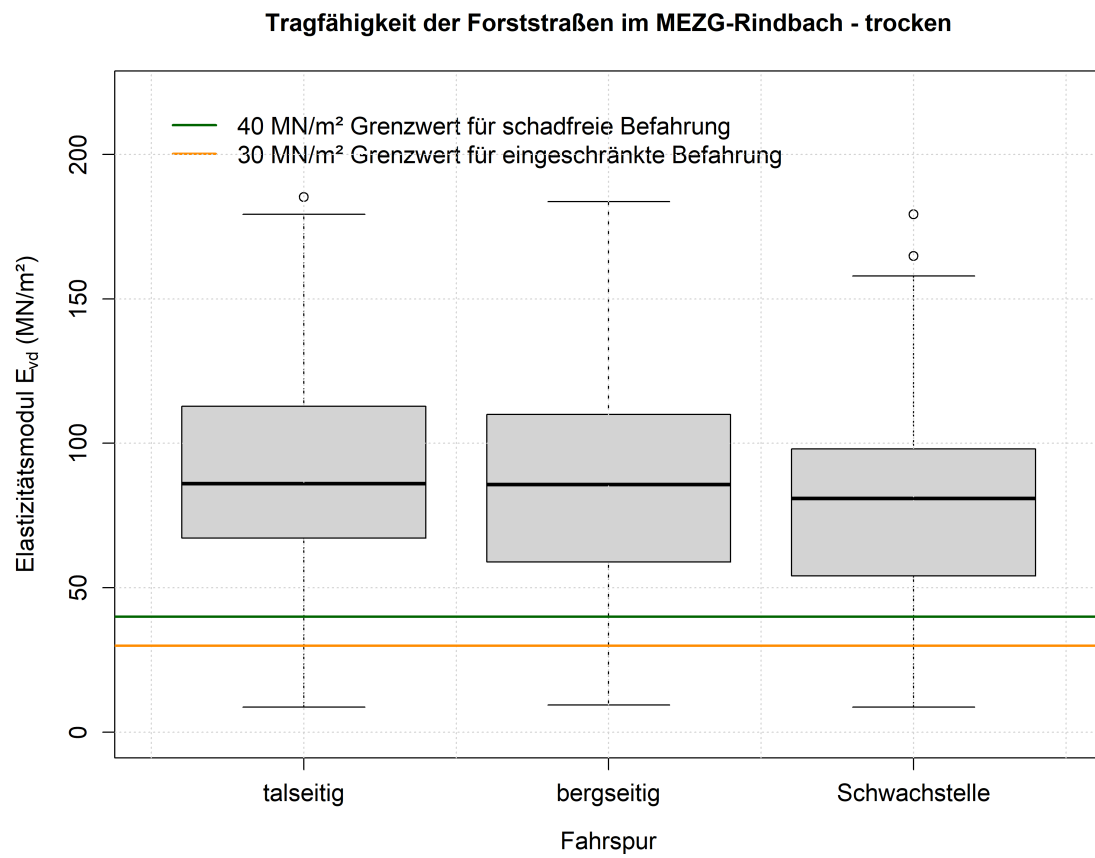
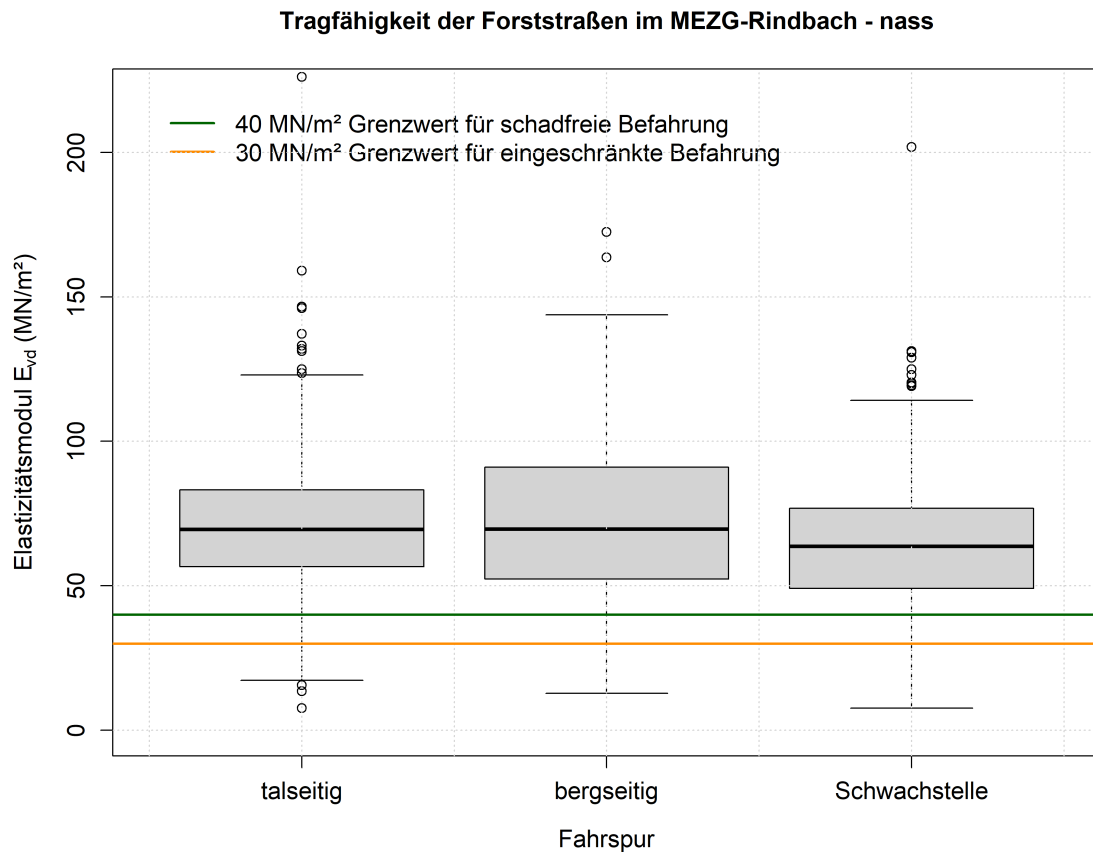


Abbildung 45 Boxplots zu den Tragfähigkeitsmessungen im „nassen“ Zustand des Straßenkörpers für das Forststraßennetze im Großteil des MEZG



Querentwässerung

Insgesamt wurden im nördlichen Einzugsgebiet des Rindbachs 159 Rohrdurchlässe erfasst. Dabei wurde die Länge von 73 Stück, der Durchmesser von 155 Stück und die Neigung von 143 Stück erfasst. Im Durchschnitt hatten diese eine Neigung von 11 %, eine Länge von 8,1 m und einen Durchmesser von knapp 50 cm (Tabelle 7). Die Durchlässe wurden anhand der Koordinaten von Ein- und Auslauf verortet (Abbildung 46). Zusätzlich wurden der Querschnitt und die Lage von zwölf Brücken im betreffenden Teileinzugsgebiet erfasst (Abbildung 47).

Tabelle 7 Deskriptive Statistik zu den erhobenen Durchlässen im MEZG-Rindbach

Kennwert	Länge (m)	Durchmesser (cm)	Neigung (%)
Anzahl	73	155	143
Mittelwert	8,1	47,9	11,0
Minimum	5,0	30,0	1,0
Maximum	17,0	100,0	28,0
Standardabweichung	2,2	13,6	5,1

Von den erfassten Durchlässen sind 105 Stück (66 %) aus Beton und 51 Stück (32 %) aus Stahl gefertigt. Drei Durchlässe waren eine Kombination aus einem Stahlrohr in einem Betonrohr. Von den Rohrdurchlässen waren knapp 59 % (94 Stück) voll, 19 % (30 Stück) nur beschränkt und 22 % (35 Stück) nicht funktionstauglich. Bei 148 Durchlässen war der Einlauf und bei 89 Durchlässen der Auslauf gegen Auskolkung gesichert. Die übrigen Ein- und Ausläufe waren ungesichert.

Abbildung 46 Erfasste und verortete Durchlässe inklusive Darstellung deren Funktionstauglichkeit

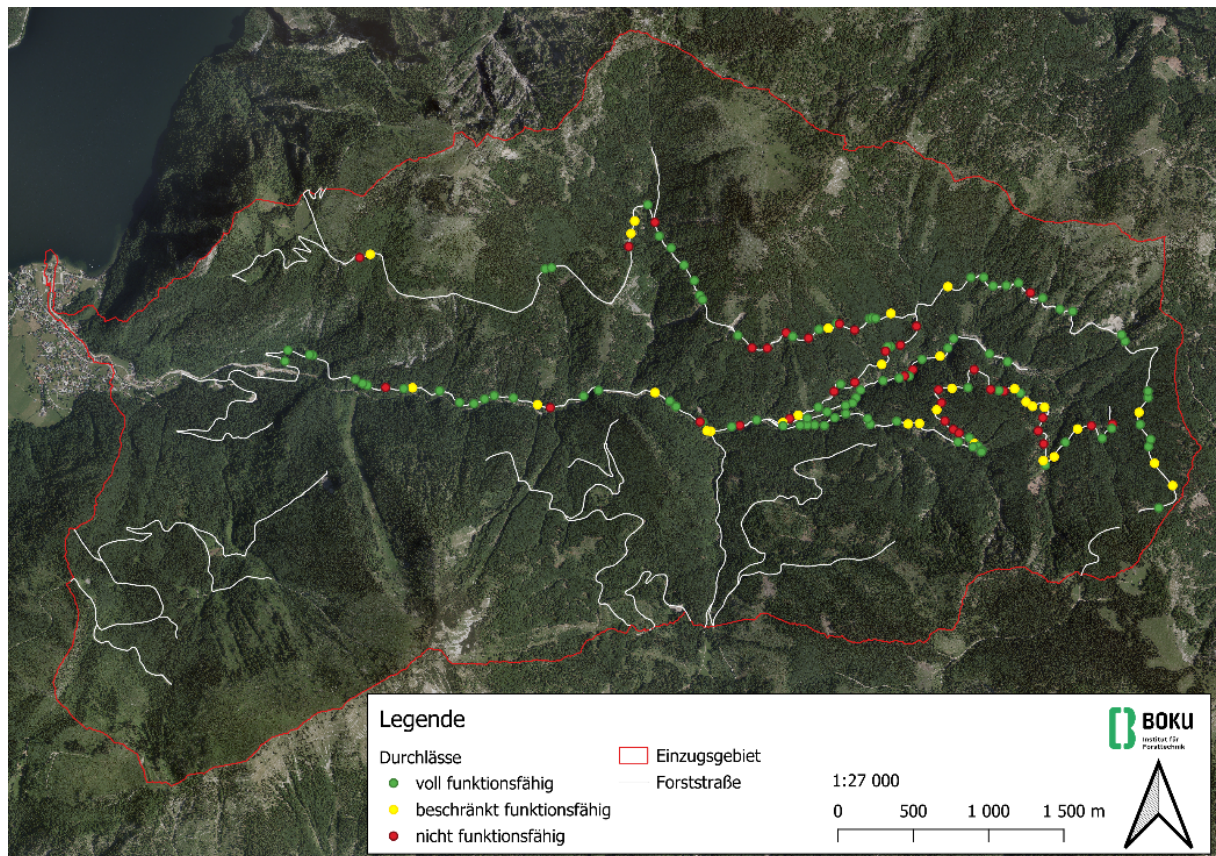
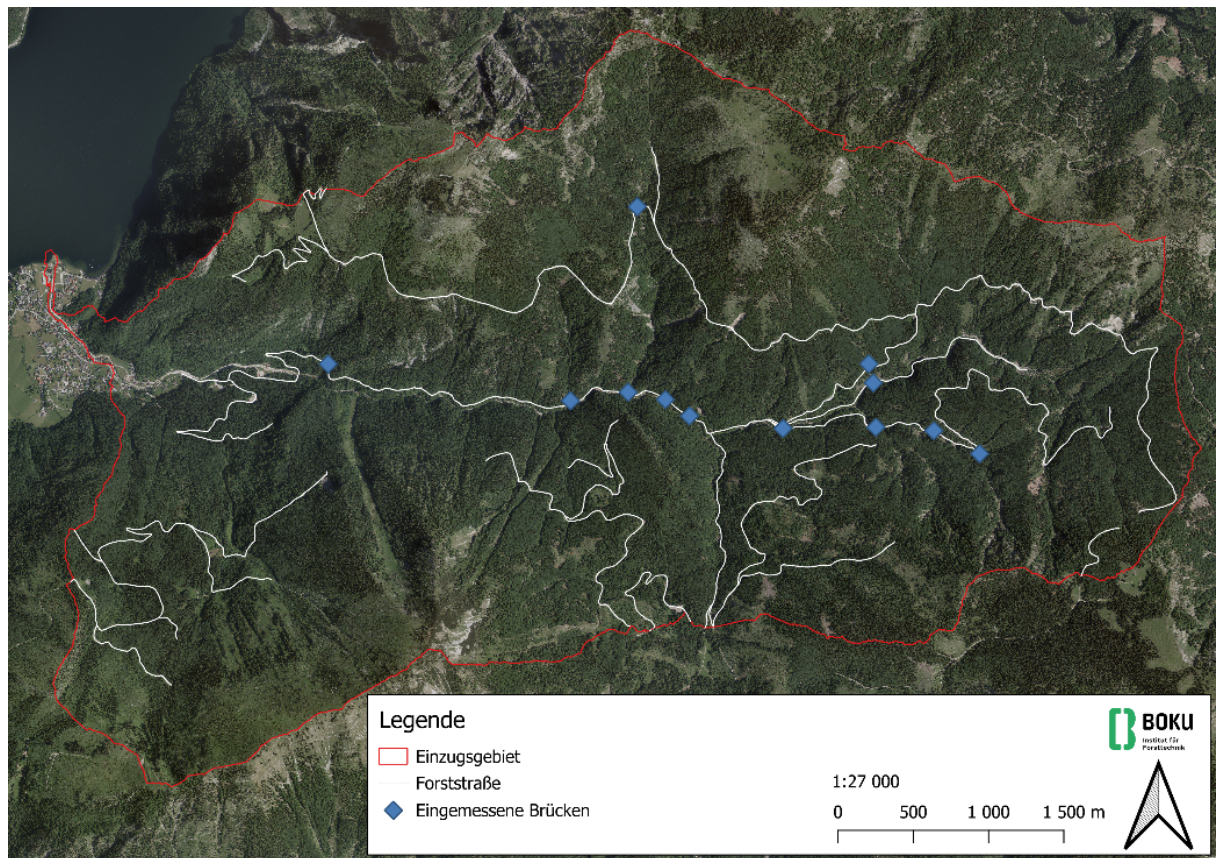


Abbildung 47 Erfasste und verortete Brücken im Nordteil des Einzugsgebietes



Fahrbahnbreite

Insgesamt wurde an den 158 Messpunkten zur Erfassung der Tragfähigkeit auch die Fahrbahnbreite mit dem Maßband ermittelt (Tabelle 8). Das Forststraßennetzwerk weist im Durchschnitt eine Fahrbahnbreite von 301 cm auf, wobei Breiten von bis zu 600 cm gemessen wurden. Alle Messungen sind zudem mittels GPS-Koordinaten verortet.

Tabelle 8 Deskriptive Statistik zu den erhobenen Fahrbahnbreiten im MEZG-Rindbach

Kennwert	Fahrbahnbreite (cm)
Anzahl	158
Mittelwert	301,1
Minimum	210,0
Maximum	600,0
Standardabweichung	59,4

Längsentwässerung und Fahrbahnoberfläche

Der Zustand der Fahrbahnoberfläche, der Längsentwässerung und die Ausprägung des Querprofils wurden auf einem 5,7 km langen Abschnitt untersucht. Dies entspricht bei der gesamten Länge des Forststraßennetzwerkes von 57,61 km einer Abdeckung von 10 % des gesamten Forststraßennetzes. Gleichzeitig wurde der Wasserabfluss und der Bewuchs auf der Fahrbahn okular geschätzt und die Neigung des Querprofils in die entsprechende Kategorie eingeordnet. Für den betreffenden Teilabschnitt, sind auch die anteiligen Ausprägungen für die einzelnen Kennwerte angeführt (Tabelle 9, Abbildung 48, Abbildung 49, Abbildung 50 und Abbildung 51).

Tabelle 9 Übersicht zum Zustand der Fahrbahnoberfläche und Längsentwässerung

Kennwert	Ausprägung	Länge (km)	Anteil (%)
Fahrbahnoberfläche	gut	1,14	20,1
	durchschnittlich	4,51	79,5
	schlecht	0,02	0,4
Längsentwässerung	funktionsfähig	1,03	18,2
	beschränkt funktionsfähig	3,60	63,5
	nicht funktionsfähig	1,04	18,3
Querprofil	bergseitig geneigt	3,35	59,1
	talwärts geneigt	2,30	40,5
	keine eindeutige Ansprache	0,02	0,4
Wasserabfluss auf der Straße	ja	5,57	98,1
	nein	0,11	1,9
Bewuchs auf der Fahrbahn	Kein Bewuchs	3,56	62,7
	5%	0,13	2,3
	10%	0,42	7,4
	15%	0,82	14,5
	20%	0,74	13,1

Abbildung 48 Erfasste und verortete Ansprache des Fahrbahnzustandes

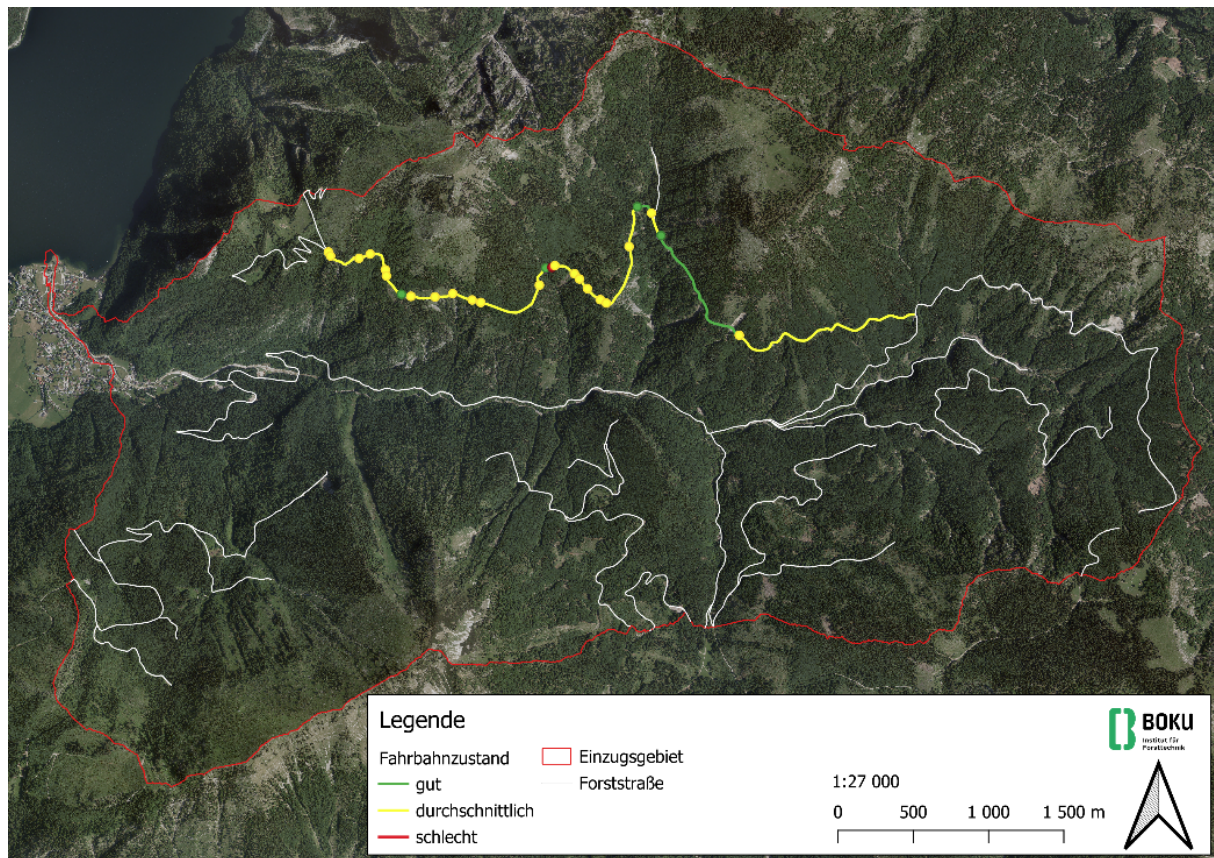


Abbildung 49 Erfasste und verortete Ansprache der Längsentwässerung

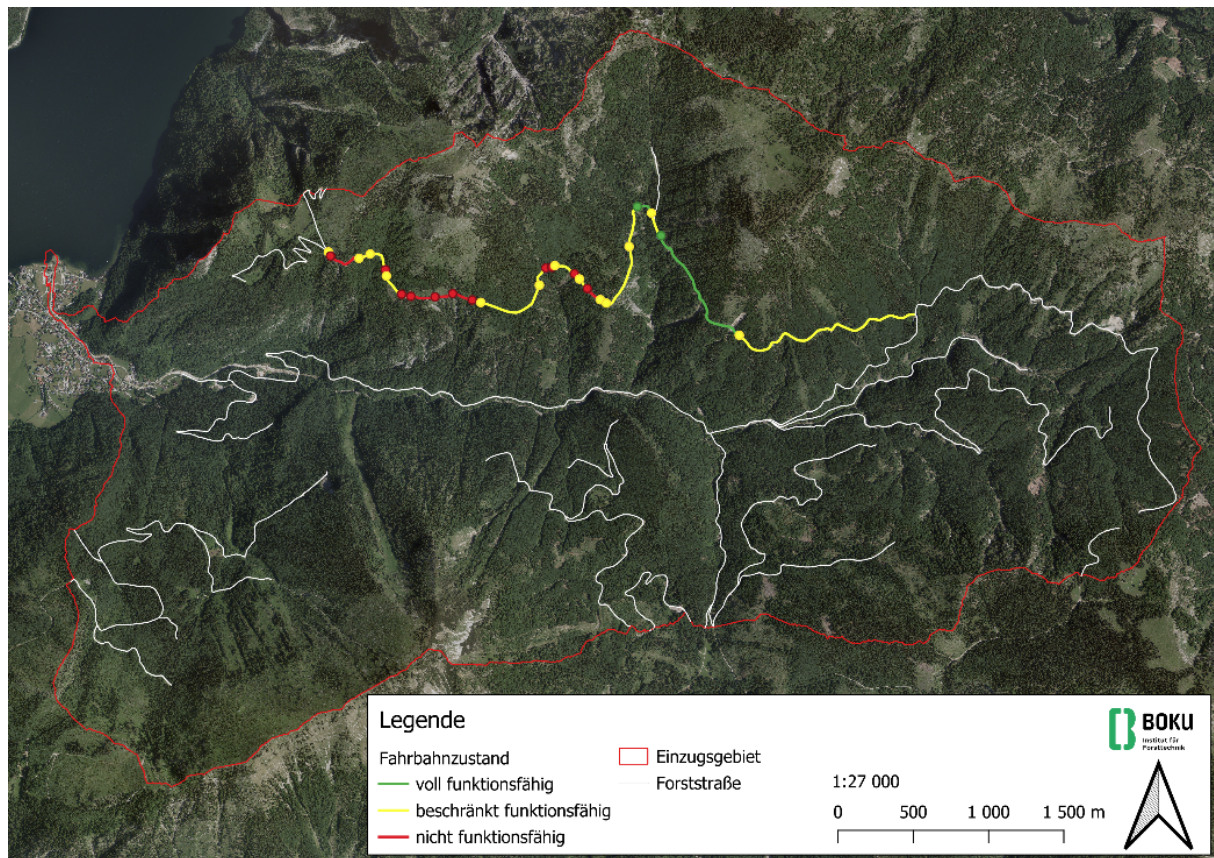


Abbildung 50 Erfasste und verortete Ansprache des Wasserabflusses auf der Fahrbahn

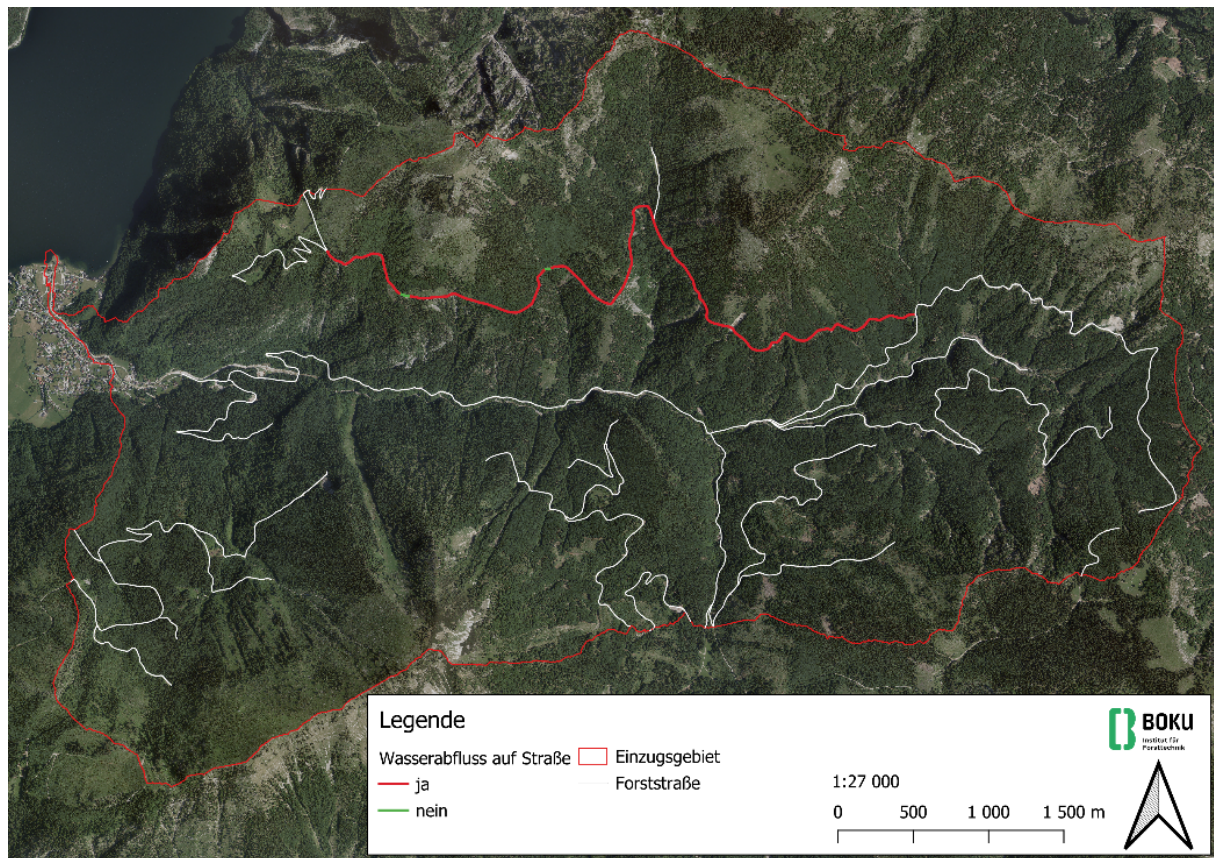
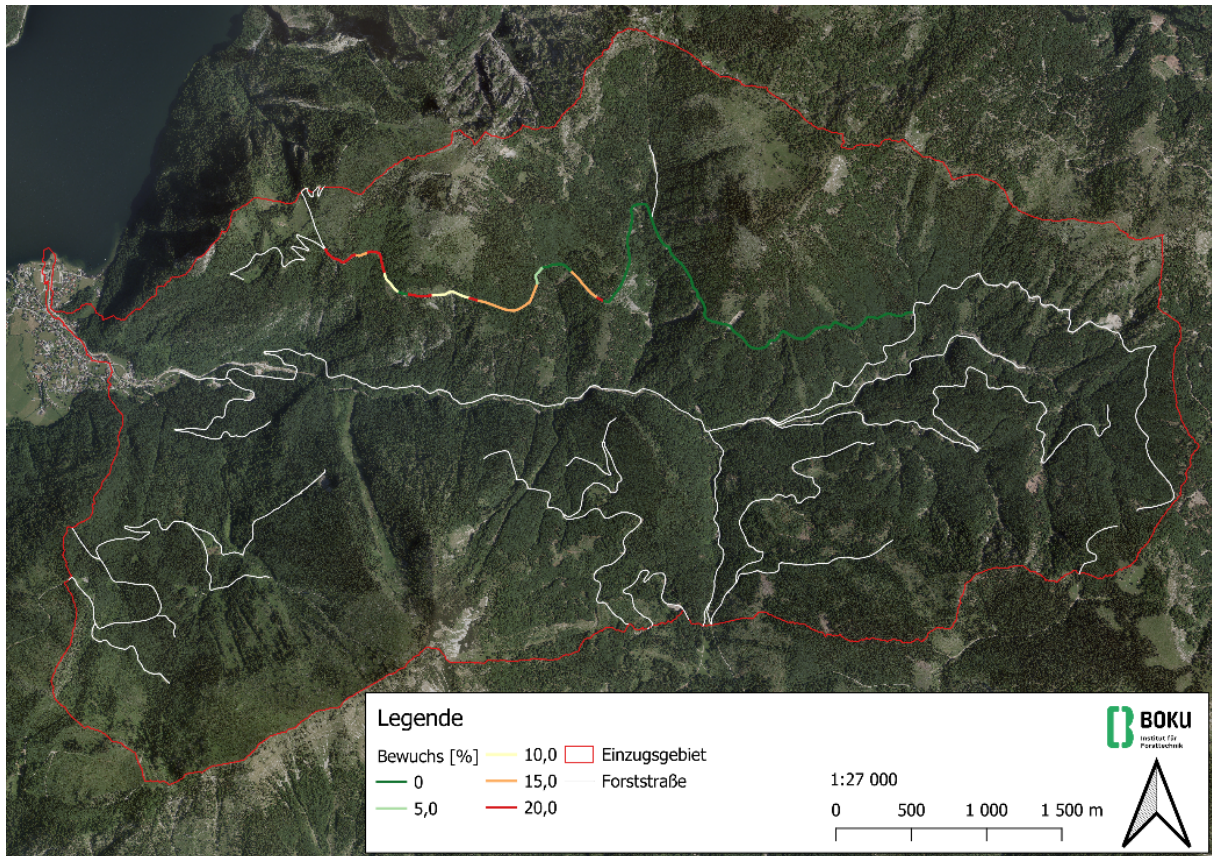


Abbildung 51 Erfasste und verortete Ansprache des Bewuchses auf der Fahrbahn



Einfluss von Forststraßen auf die Abflussdynamik

In TG1 sind die Unterschiede zwischen den drei Szenarien gering. Q_{max} beträgt 5,20/5,00/5,1 $m^3 s^{-1}$ (Natur/Optimal/Ist). V , t_{peak} , r_{10-90} und RBI variieren nur minimal. In TG2_3 zeigen sich deutlichere Abweichungen. Q_{max} liegt bei 8,90/7,5/6,80 $m^3 s^{-1}$, das V bei 21.500/21.000/20.500 m^3 (Natur/Optimal/Ist), t_{peak} verlängert sich, r_{10-90} nimmt ab. Der RBI ist im Naturzustand am höchsten und fällt in den Szenarien mit Infrastruktur niedriger aus. Die Ganglinien weisen in den Szenarien „Optimal“ und „Ist“ niedrigere Scheitel und eine längere Abflussdauer auf (Amerhauser, 2025).

Die Aussagekraft der Simulationen ist aufgrund der vereinfachten Bodensetzung und der Bauwerksannahmen begrenzt. Da detaillierte Bodenkarten nicht vorlagen, wurde im gesamten Modellgebiet der Bodentyp Rendzina und die damit verbundenen Parameter aus der NASIM-Musterbibliothek verwendet. Dadurch bleibt die im Gebiet vorkommende Bodenheterogenität unberücksichtigt. Zudem wurde die vorhandene Brücke im Gebiet als Kastenkanal mit unbegrenztem Stauraum modelliert. Dies glättet die Scheitel und verlängert

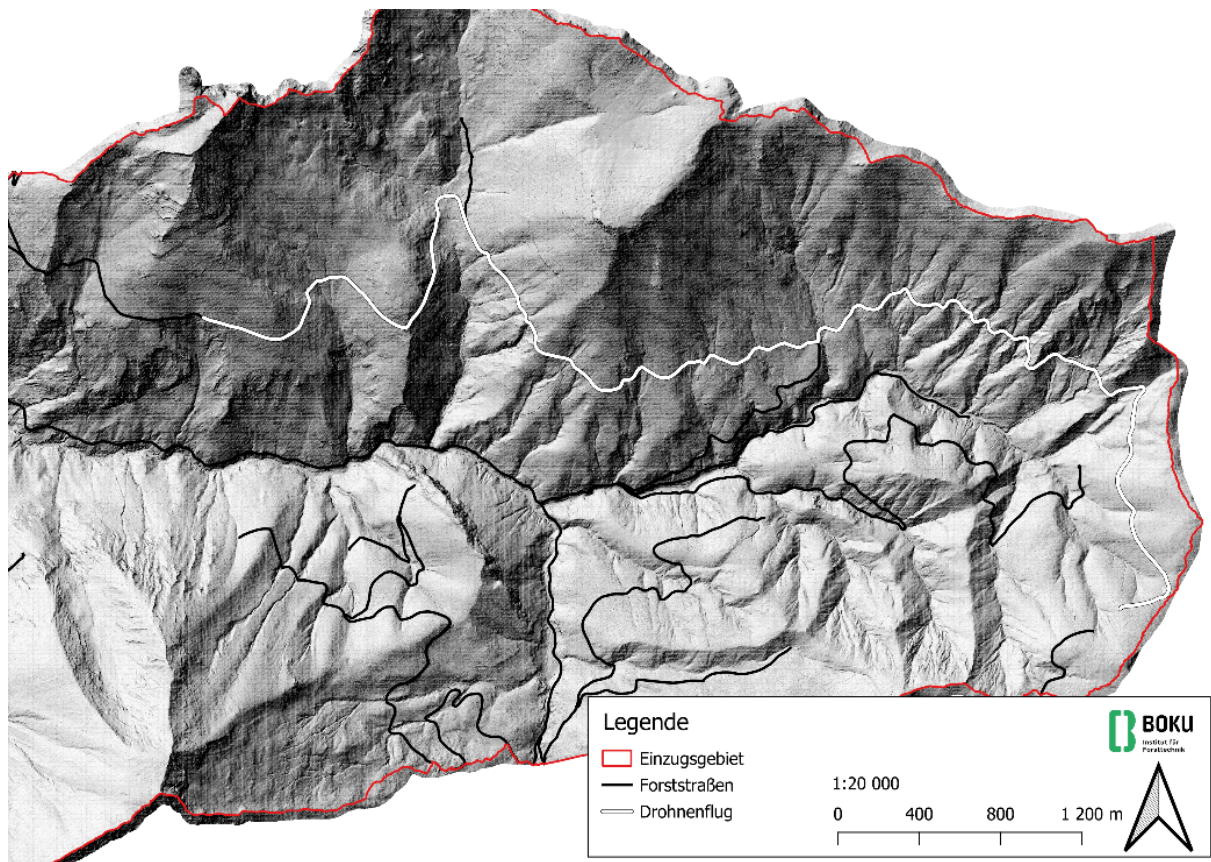
die Abflussdauer. Eine Kalibrierung bzw. Rückwärtsmodellierung gegen Messdaten erfolgte nicht (Amerhauser, 2025).

Obwohl in allen Szenarien derselbe Bemessungsniederschlag auf die gleichen Teilgebiete (TG1 und TG2_3) wirkt, wären unter massenerhaltenden Randbedingungen identische Ereignisabflussvolumen (V) zu erwarten. Tatsächlich unterscheiden sich die berechneten Volumina jedoch zwischen den Szenarien. Eine plausible Ursache hierfür liegt in der Parametrisierung der Szenarien und den Programmlimitationen. Durch die Integration zusätzlicher Infrastruktureinheiten (Längs- und Querentwässerungen) ändern sich kleinräumig die Speicher- und Leitungsparameter. Nach derzeitiger Einschätzung stößt NASIM dabei an konzeptionelle und numerische Grenzen, insbesondere weil sehr kleine Volumina (wie die des Längsgrabens) nicht exakt verarbeitet werden können. Entsprechende Warnhinweise während des Durchlaufs der Simulationen deuten auf ungenaue Ergebnisse hin. Dies kann zu künstlich unterschiedlichen V-Werten zwischen den Szenarien führen. Im Wesentlichen konnte aber gezeigt werden, dass die Forststraßen im TG2_3 eine abflussverzögernde Wirkung haben (Amerhauser, 2025).

Drohnenbefliegung mit Laserscanner

Die zwei durchgeführten Laserscanbefliegungen mittels Drohne decken einen Streckenabschnitt im Norden des MEZG ab, mit einer Länge von 8,93 km (Abbildung 52).

Abbildung 52 Forststraßenabschnitt mittels Drohnenbefliegung und Laserscanner



Die Punktwolke ermöglicht eine detaillierte Darstellung und Abgrenzung des Forststraßenkörpers inklusive der Identifizierung der Einläufe bzw. Ausläufe der Querentwässerungen. Anhand der Visualisierung der 3D-Punktwolke ist auch eine detaillierte Analyse des Querprofils möglich. Deutlich erkennbar sind die bergseitigen und talseitigen Böschungsflächen, allfällige Spurrinnenbildungen auf der Fahrbahn, die Profilgestaltung sowie die Längsentwässerung (Abbildung 53, Abbildung 54, Abbildung 55 und Abbildung 56).

Abbildung 53 Beispiel zu einem digitalisierten Forststraßenabschnitt mittels
Drohnenbefliegung mit Laserscanner in der Übersicht

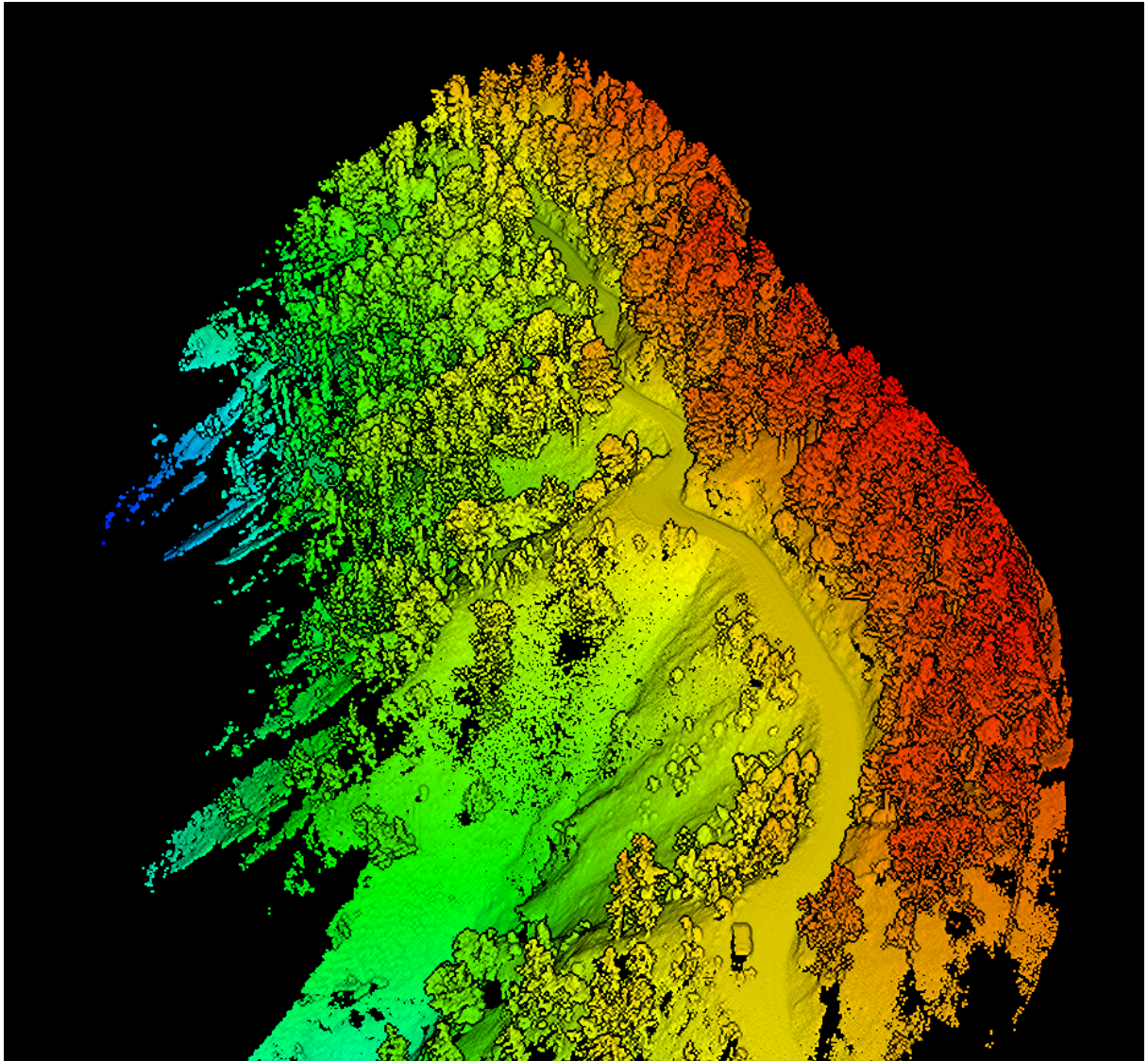


Abbildung 54 Beispiel zu dem digitalisierten Forststraßenabschnitt mittels Drohnenbefliegung mit Laserscanner in Detailansicht

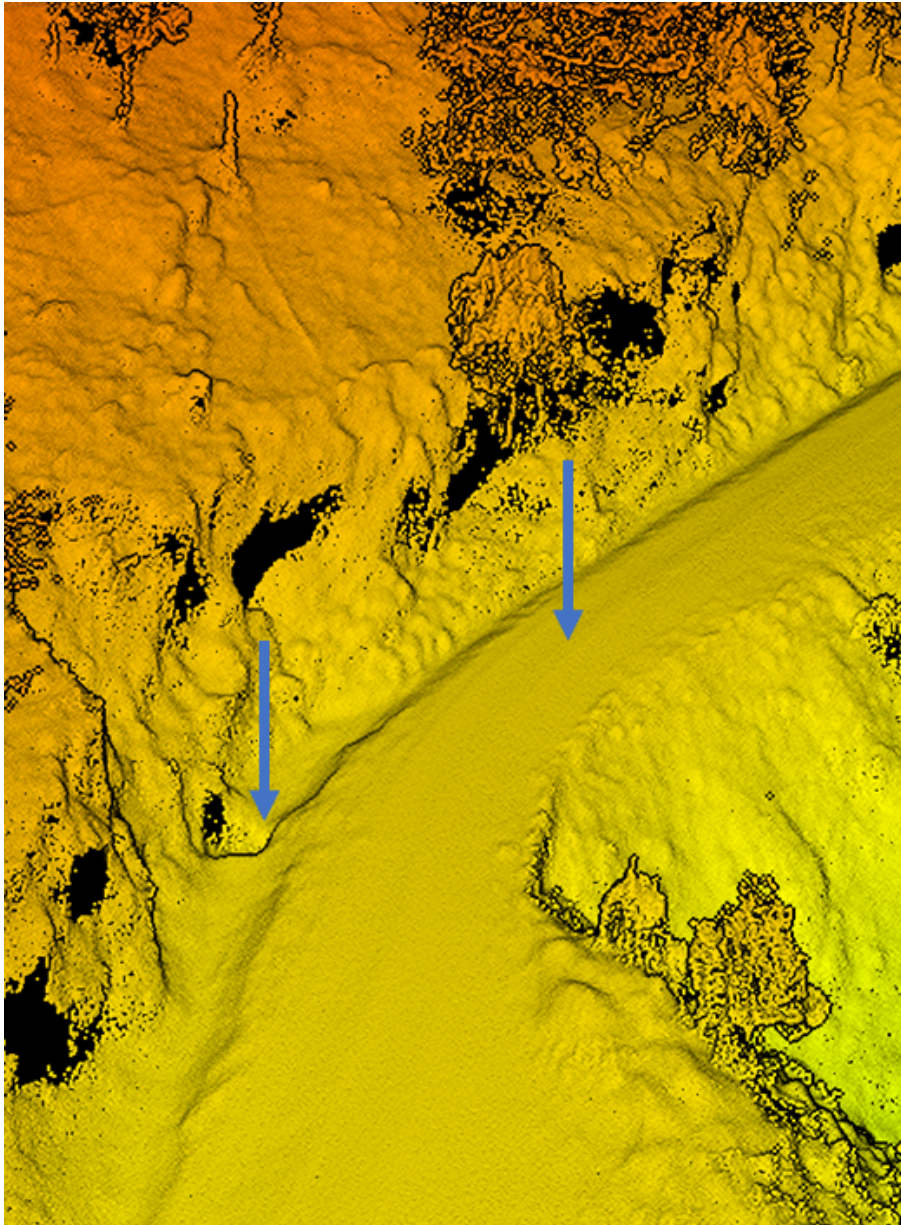


Abbildung 55 Beispiel zu einem digitalisierten Querschnitt eines Forststraßenabschnittes mittels Drohnenbefliegung mit Laserscanner

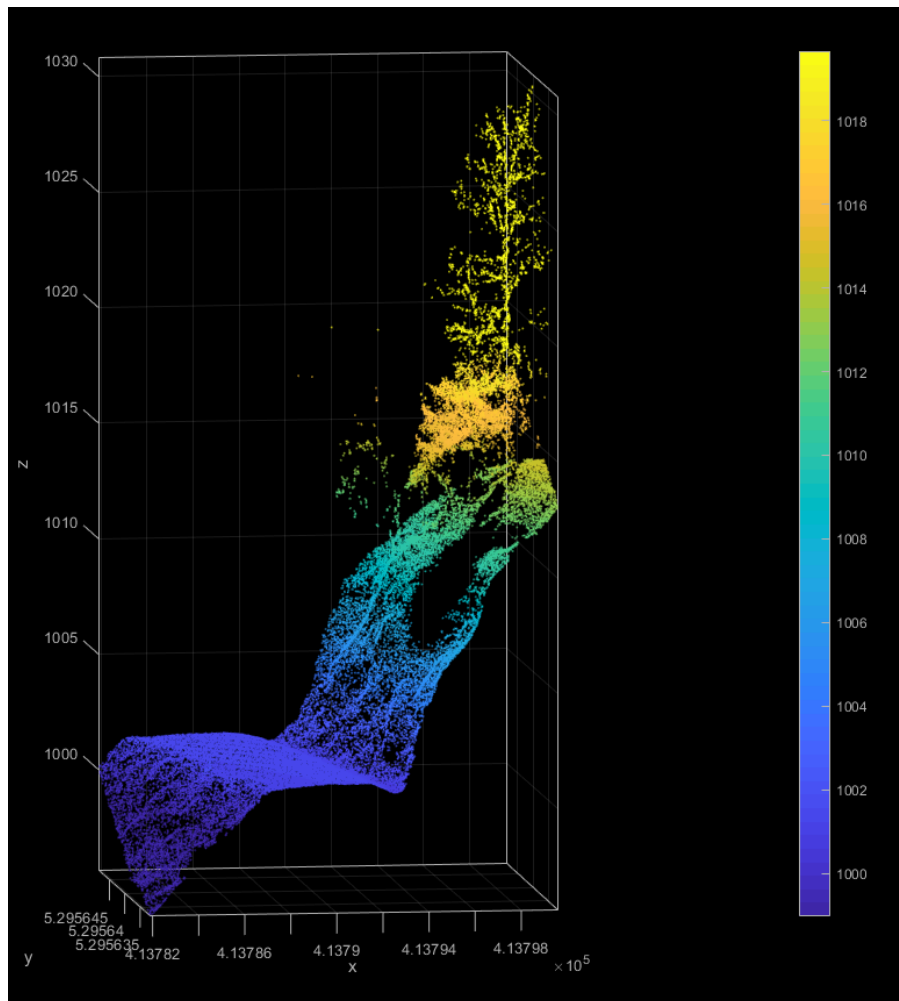
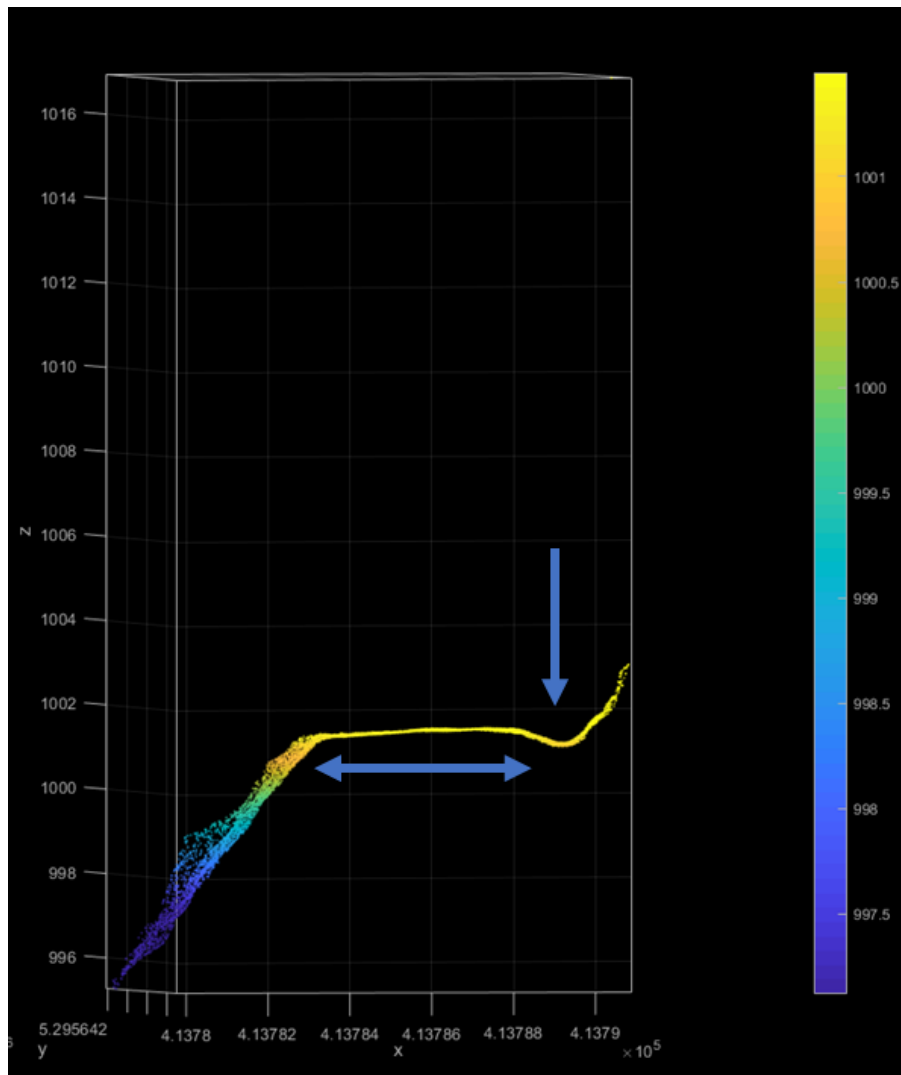


Abbildung 56 Beispiel zu einem digitalisierten Querschnitt eines Forststraßenabschnittes mittels Drohnenbefliegung mit Laserscanner



Photogrammetrische Aufnahmen

Parallel zu den Erhebungen vor Ort wurde ein Großteil des Forststraßennetzwerks mittels photogrammetrischer Aufnahmen und der Structure-from-Motion-Technik erfasst. Insgesamt wurden 25.300 Bilder mit einer Gesamtlänge von 28,01 km ausgewertet (Abbildung 57). Die einzelnen Bilder der Aufnahmen bilden nicht nur die Basis für die Erstellung eines digitalen Abbilds, sondern dokumentieren auch lückenlos den Zustand der Forststraße im Detail auf der gesamten Länge des jeweiligen Abschnitts zum Zeitpunkt der Aufnahme (Abbildung 58). Bei der Verarbeitung der Abschnitte konnten nicht alle lückenlos weiterverarbeitet werden. Als Beispiel sei ein 3,84 km langer Abschnitt im Zentrum des MEZG angeführt. Dieser wurde mit 2.995 Bildern erfasst (Abbildung 59).

Abbildung 57 Übersicht zu den erhobenen Straßenabschnitten mittels Photogrammetrie im MEZG

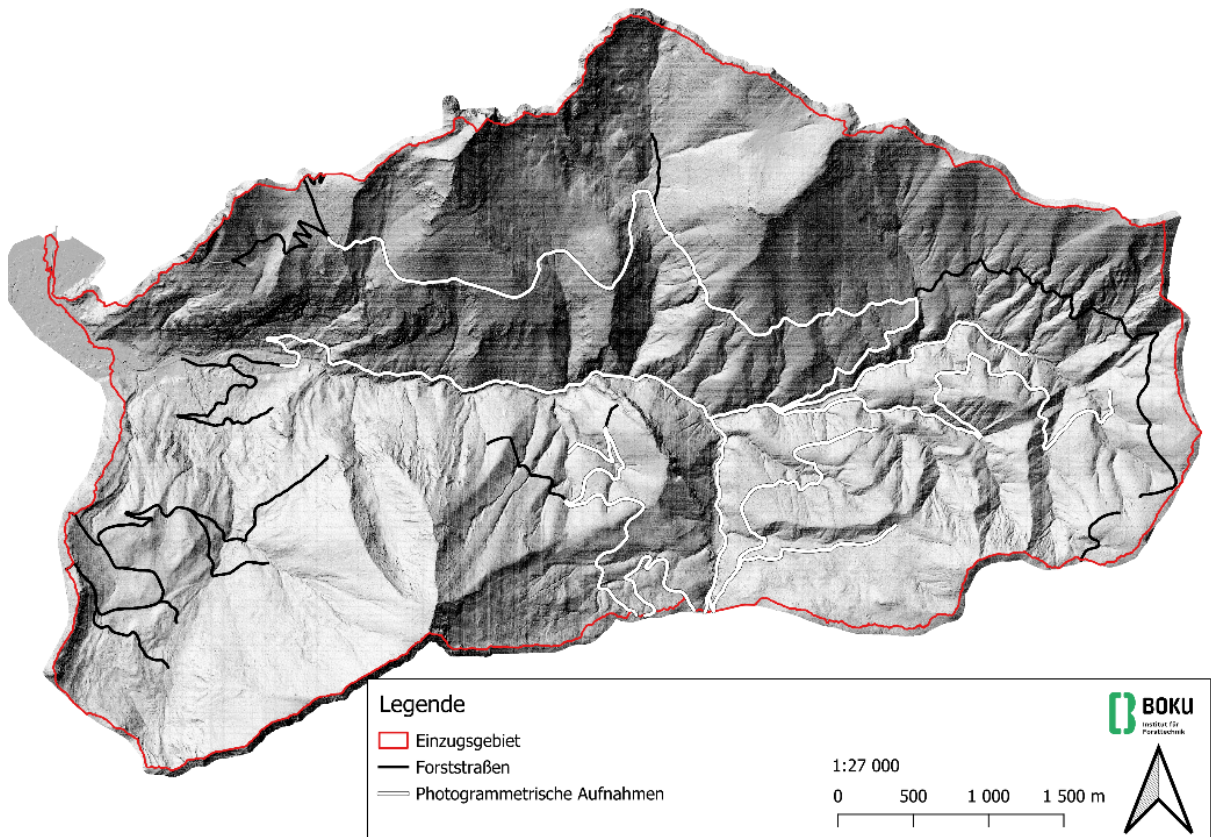
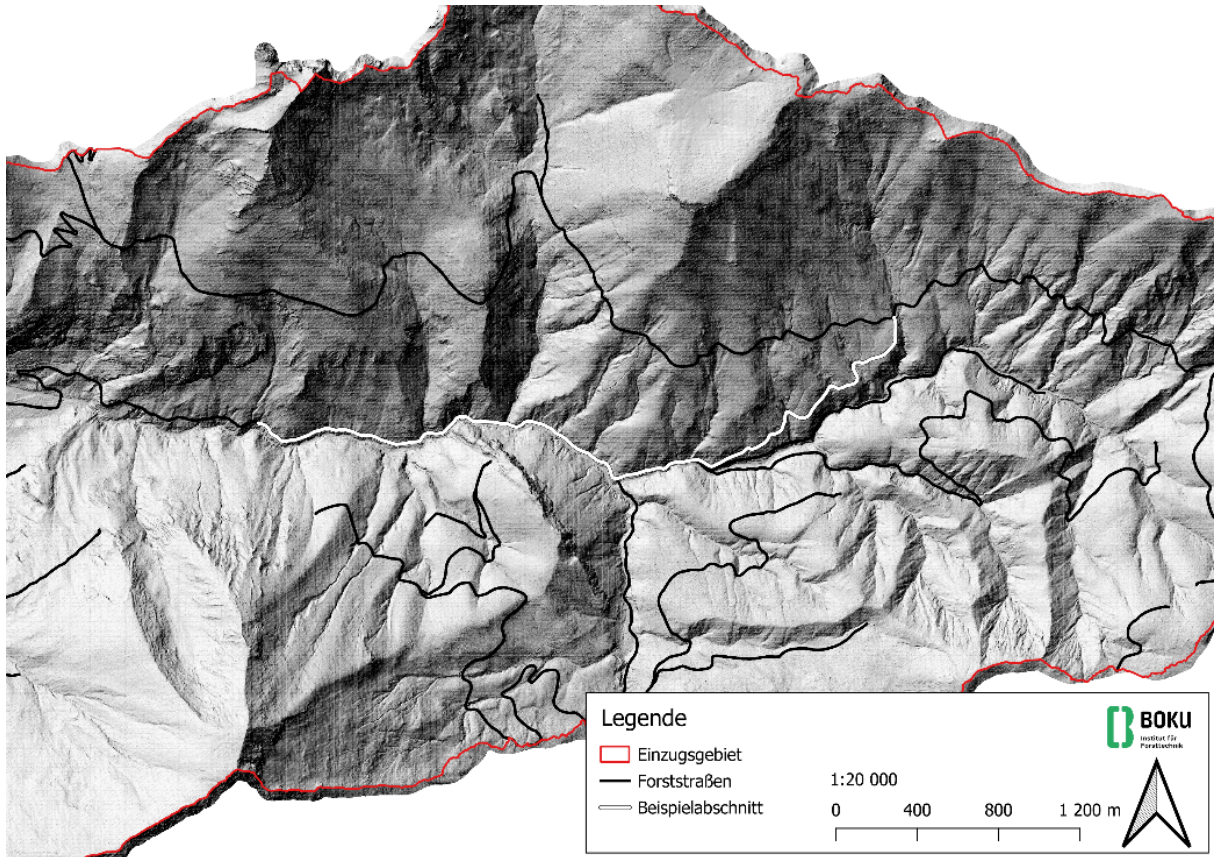


Abbildung 58 Originalbild von den in Summe 25.300 Bildern umfassende photogrammetrische Aufnahme mit klar erkennbarem Zustand der Forststraße inklusive Oberflächenabfluss und Längsentwässerung



Abbildung 59 Lage des Beispielabschnittes mit den photogrammetrischen Aufnahmen im MEZG



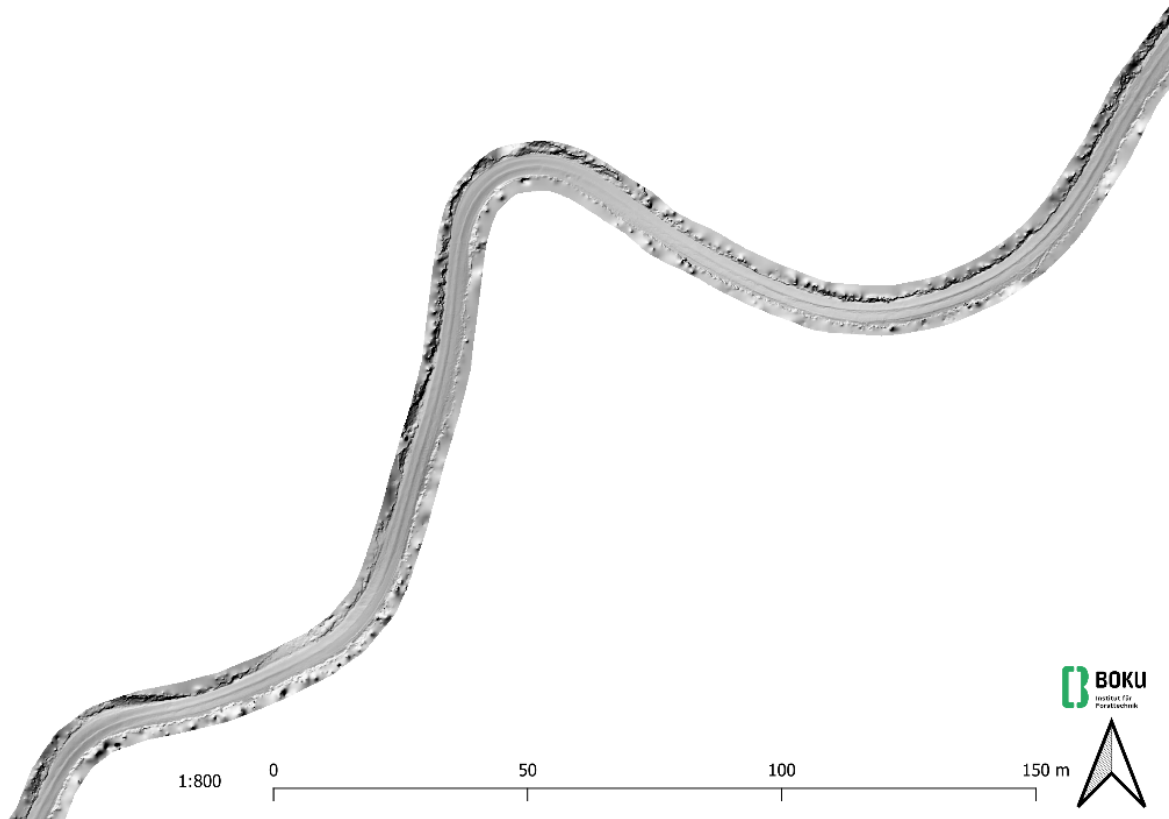
Agisoft Metashape konnte davon 2.985 Bilder eindeutig verarbeiten und daraus ein 3D-Modell bestehend aus 1.095.661 Punkten erstellen, wobei hier noch ohne Kalibrierung der jeweiligen Kameras für die Erstellung des Modells gearbeitet wurde. (Abbildung 60).

Abbildung 60 Ausschnitt zu einem digitalisierten Abschnitt mittels photogrammetrischer Aufnahmen und ausgearbeiteter 3D-Punktwolke mittels Structure from Motion-Technik



Mit dem entwickelten 3D-Modell wurde nun digitales Geländemodell mit einer Auflösung von 10 cm/Pixel erstellt, welches in weiterer Folge weiter analysiert werden kann (Abbildung 61).

Abbildung 61 Erstelltes digitale Geländemodell vom Beispielabschnitt mit einer Auflösung von 10 cm/Pixel



Bestandserhebung basierend auf Geodaten

Der Bestand aller für LKW befahrbaren Forststraßen wurde zuerst mithilfe des Orthofotos in Kombination mit dem digitalen Geländemodell als Polygon ausgeschieden. Insgesamt wurden auf diese Weise 57,61 km Forststraßen im MEZG erfasst. Auf einer Länge von 48,68 km wurden anschließend Felderhebungen durchgeführt, wodurch diese auch als LKW-befahrbare Forststraßen verifiziert wurden. Dies entspricht einem Anteil von 84,5 %. Der restliche Anteil mit einer Länge von 8,93 km wurde nur auf Basis der vorliegenden Geodaten ausgeschieden und nicht weiter vor Ort verifiziert.

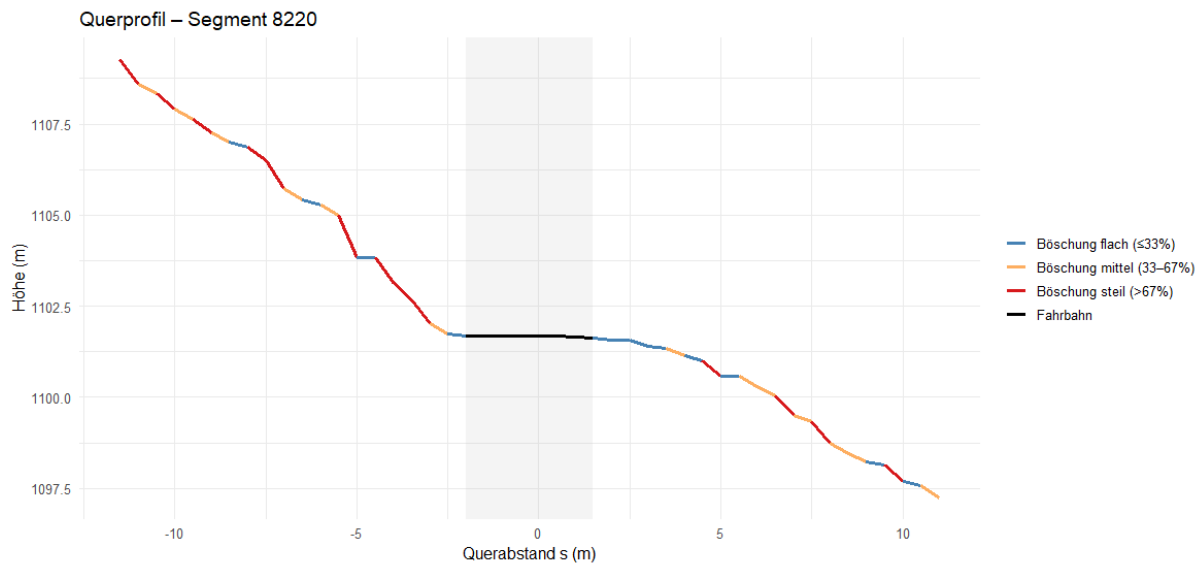
Die Längsneigung der Forststraße wurde auf Basis von 5 m langen Abschnitten in Kombination mit dem digitalen Geländemodell mit einer Auflösung von 0,5 m durchgeführt. Die durchschnittliche Längsneigung aller Segmente für die 48,68 km beträgt 7,1 %. In Summe weisen 38,75 km (79,6 %) eine Längsneigung bis 11 % auf. Der restliche Anteil mit 20,4 % entfällt auf die steileren Abschnitte (Tabelle 10).

Tabelle 10 Anteilige Längen je Neigungsklasse für das verifizierte LKW-befahrbare Forststraßennetz im MEZG

Neigungsklasse	Länge (km)	Anteil (%)
0–3 %	10,38	21,3
3–5 %	7,49	15,4
5–8 %	11,10	22,8
8–11 %	9,78	20,1
11–15 %	8,15	16,7
>15 %	1,78	3,7
Summe	48,68	100

Für ausgewählte Querprofile wurden auf Basis der digitalisierten Forststraßen in Kombination mit dem vorliegenden DGM Querprofile ausgeschieden, die Geländeneigung des Profils analysiert und in Klassen eingeteilt. Dies ermöglicht in jedem Profil die Klassifizierung der Fahrbahn mit angrenzendem Bankett, Längsentwässerung sowie Böschungswinkel auf der Berg- sowie und Talseite. In Summe liegen für das gesamte MEZG 8.656 Querprofile vor (Abbildung 62).

Abbildung 62 Beispiel für ein generiertes und analysiertes Querprofil auf Basis des DGM mit 50 cm/Pixel Auflösung und den entsprechenden Geländeneigungsklassen zur Identifizierung der einzelnen Abschnitte

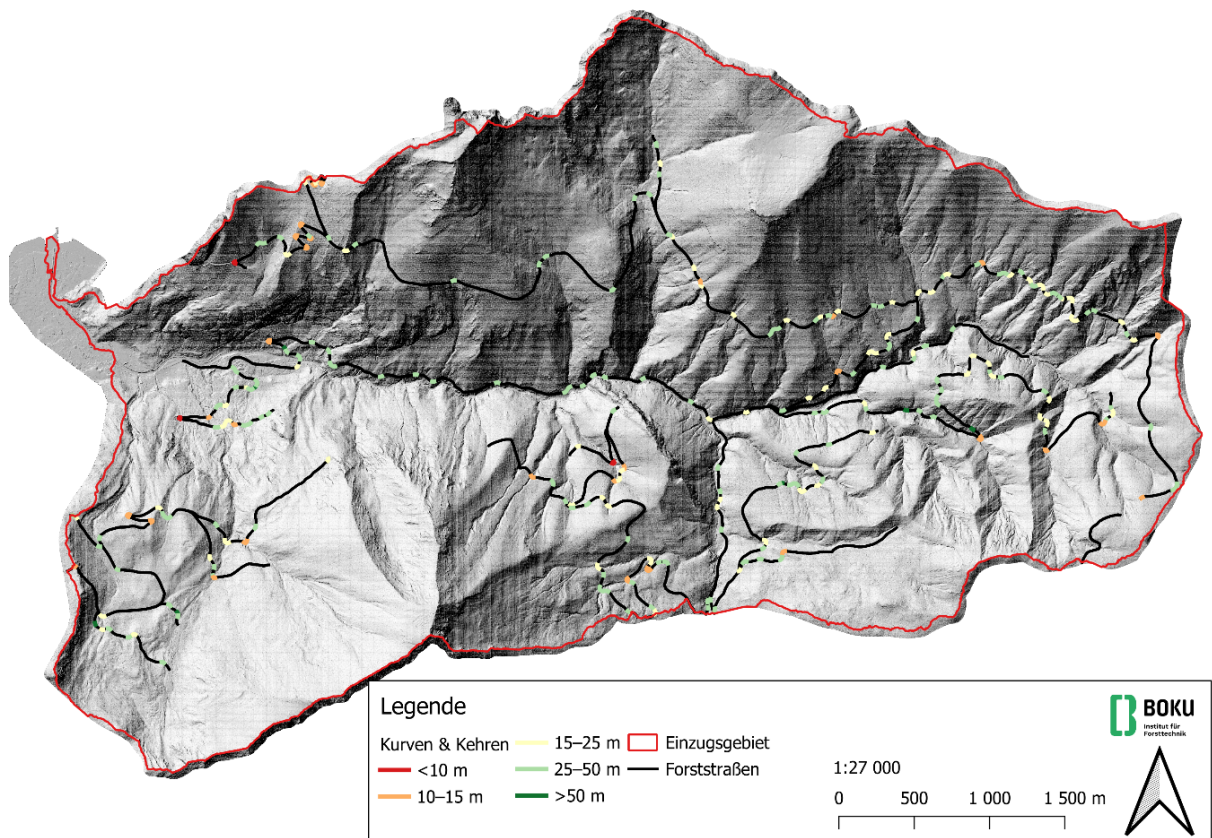


Das gesamte Forststraßennetz weist drei Kehren mit einem Achsradius (Mittellinie) von weniger als 10 m auf. Somit ist es an der Grenze für die Befahrung mit LKW und Anhänger. In der nächsten Klasse (10-15 m) gibt es 31 Abschnitte. Diese sind für den Holztransport aber ohne weitere Probleme technisch befahrbar (Tabelle 11).

Tabelle 11 Anzahl Kurven und Kehren je Radius für das LKW-befahrbares Forststraßennetz im MEZG

Radien-Klasse	Anzahl
<10 m	3
10–15 m	31
15–25 m	75
25–50 m	140
>50 m	7

Abbildung 63 Analyisierte Kurven- und Kehrenradien im gesamten MEZG



Zusammenfassung

Tätigkeitsbericht im Überblick

Insgesamt wurden an 18 Tagen im MEZG-Rindbach Feldaufnahmen mit einem Umfang von 43 Personentagen durchgeführt. Im Rahmen der FORMEC 2024 in Danzig wurde das Projekt auch in Form eines Posters einem internationalen wissenschaftlichen Konsortium vorgestellt. Im April 2024 bestand noch die Möglichkeit, sich mit der Doktorandin Helle Ross Gobakken vom Norwegian Institute of Bioeconomy Research (NIBIO) über den aktuellen Stand der Projektarbeiten im Bereich digitaler Felderhebungen für das Monitoring von Forststraßen auszutauschen (Tabelle 12).

Tabelle 12 Übersicht zu den Aktivitäten im MEZG-Rindbach und zu Veranstaltungen bei denen das Projekt und dessen Inhalt präsentiert und diskutiert wurde mit Fokus auf das AP 5.2

Datum	Titel und Ort	Inhalt	Mitwirkende
01.06 bis 02.06.2023	Feldaufnahmen im NW-Teil des MEZG	Erhebungen zu Lage, Zustand und Bauart der Durchlässe, Zustandserhebung der Forststraße im NW-Abschnitt	Holzleitner, F. und Amerhauser, E.
13.06 bis 14.06.2023	Feldaufnahmen im Großteil des MEZG	Messungen der Tragfähigkeit des Forststraßenkörpers im „trockenen“ Zustand	Amerhauser, E. und Singer A.
07.11. bis 08.11.2023	Feldaufnahmen im NW-Teil des MEZG	Erhebungen zu Lage, Zustand und Bauart der Durchlässe, Zustandserhebung der Forststraße im NW-Abschnitt	Holzleitner, F. und Amerhauser, E.
08.11.2023	Drohnenflug im NW-Teil des MEZG	Befliegung Testabschnitt im NW-Teil des MEZG – Erhebung der Forststraße	Holzleitner, F.; Amerhauser, E. und Mihatsch N.
28.02. bis 29.02.2024	Rindbach-Meeting -Stand der Dinge (Öffentlich und Projektteam)	Vorstellung der laufenden Arbeiten im Projekt inklusive Ausblick samt Knowledge-Café	Holzleitner, F.; Amerhauser, E; Mihatsch, N. und Immitzer, M.
15.04. bis 17.04.2024	Fachaustausch und Aufnahmen im NW-Teil des MEZG	Fachaustausch mit Helle Ross Gobakken von NIBIO (Norwegen), Erhebungen zu Lage, Zustand und Bauart der Durchlässe, Zustandserhebung der Forststraße im NW-Abschnitt	Holzleitner, F.; Amerhauser, E. und Helle Ross Gobakken (NIBIO)
29.04.2024	Feldaufnahmen im NW-Teil des MEZG	Messungen der Tragfähigkeit des Forststraßenkörpers im „nassen“ Zustand	Amerhauser, E.
27.05. bis 28.05.2024	Drohnenflug im NW-Teil des MEZG	Befliegung im NW-Teil des MEZG – Erhebung eines Forststraßenabschnittes	Amerhauser, E. und Mihatsch N.
11.06. bis 14.06.2024	Fachaustausch im Rahmen der FORMEC 2024 (https://www.formec.org/) in Danzig (Polen)	Poster: “Fast lane: Survey and status assessment of forest roads based on airborne data combined with field records”	Holzleitner, F.; Amerhauser, E; Mihatsch, N. und Immitzer, M.
11.06. bis 12.06.2024	Feldaufnahmen im Großteil des MEZG	Messungen der Tragfähigkeit des Forststraßenkörpers im „nassen“ Zustand	Amerhauser, E.

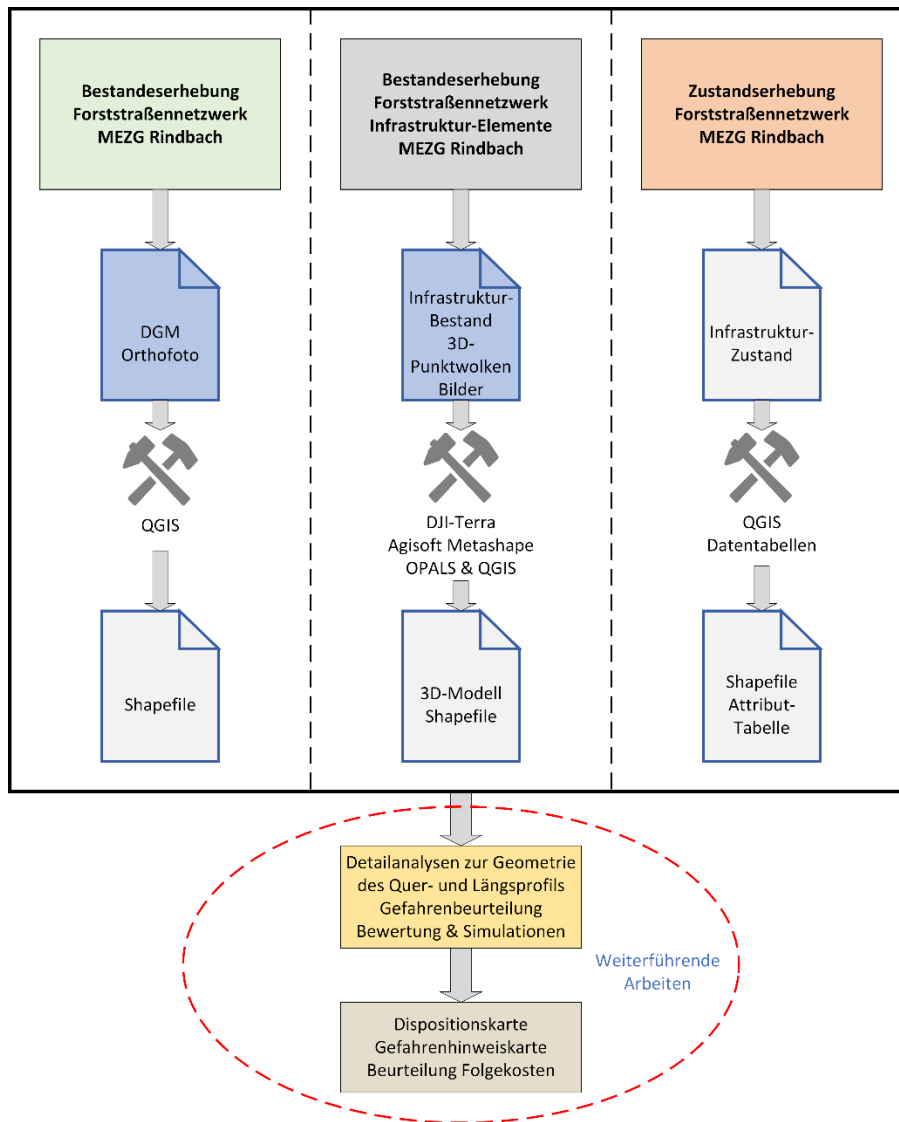
Datum	Titel und Ort	Inhalt	Mitwirkende
22.07. bis 25.07. 2025	Feldaufnahmen im MEZG	Erhebungen zu Lage, Zustand und Bauart der Durchlässe, photogrammetrische Erhebungen zu den Forststraßen	Holzleitner, F.; Amerhauser, E. und Nella Faltak

Digitales Forststraßennetzwerk – Weiterführende Arbeiten

Das Hauptziel des Projekts bestand in der Erhebung von Grundlagendaten zum Forststraßennetz im MEZG-Rindbach für künftige Projekte und Analysen. Hinsichtlich der erhobenen Daten im Projektgebiet lassen sich folgende, weiterführende Arbeiten und mögliche Detailanalysen bereits jetzt identifizieren (Abbildung 64):

- Analysen und Bewertung des Straßenkörpers hinsichtlich des Quer- und Längsprofils (Neigung Straßenkörper, Grabenvolumen, Spurrinnenbildung, Böschungswinkel im Straßenkorridor) auf Basis der Laserscan-Daten von der bereits vorhandenen Befliegung für das gesamte Gebiet und der Drohnenbefliegung
- Analysen und Bewertung des Straßenkörpers sowie des Quer- und Längsprofils, Oberflächenabflüsse sowie Bewuchs anhand der photogrammetrischen Erhebungen
- Weiterführende Simulationen und Verdichtung der Datenbasis in Anlehnung an die Masterarbeit von Amerhauser (2025)
- Abschätzung des Schadpotenzials für das Forststraßennetzes auf Basis der erhobenen Daten am Forststraßenkörper durch Umwelteinflüsse inklusive Ableitung von notwendigen Instandhaltungs- bzw. Sanierungsmaßnahmen
- Ableitung einer Risikobewertung auf Basis des geschätzten Schadpotenzials

Abbildung 64 Weiterführende Arbeiten



Auf Basis des Orthofotos und des bereits digitalisierte Forststraßennetzwerkes bietet sich auch die Möglichkeit zur automatischen Digitalisierung der Forststraßen mittels Object Based Image Classification (Objektbasierte Bildklassifikation) in QGIS an. Bei der objektbasierten Bildklassifikation (Object-Based Image Classification, OBIC) handelt es sich um eine Methode zur Klassifizierung von Satelliten- oder Luftbildern. Versuchsweise wurde hierzu auf die in QGIS integrierte OrfeoToolBox (OTB) zurückgegriffen (Abbildung 65 und Abbildung 66).

Abbildung 65 Beispiel zur automatisierten Klassifikation mittels OTB-Werkzeuge mit Orthofoto im Hintergrund

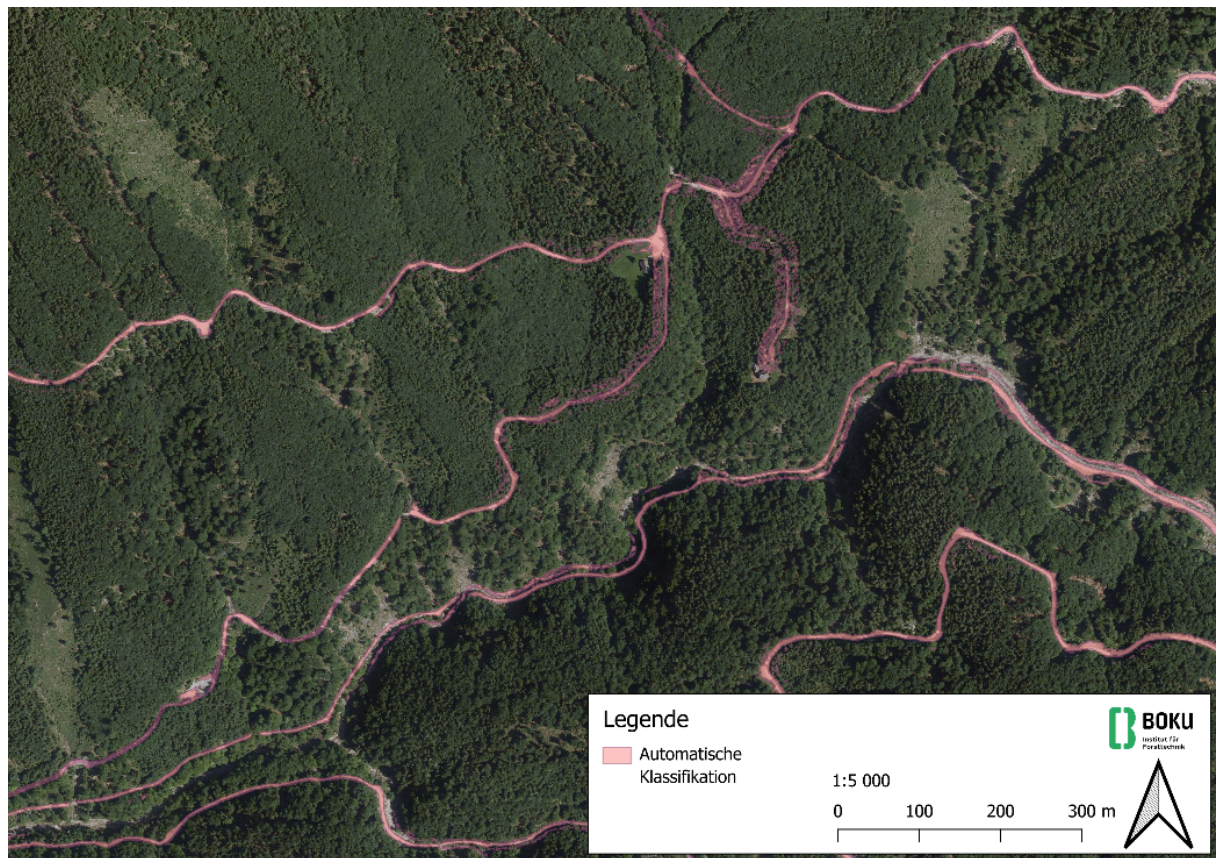
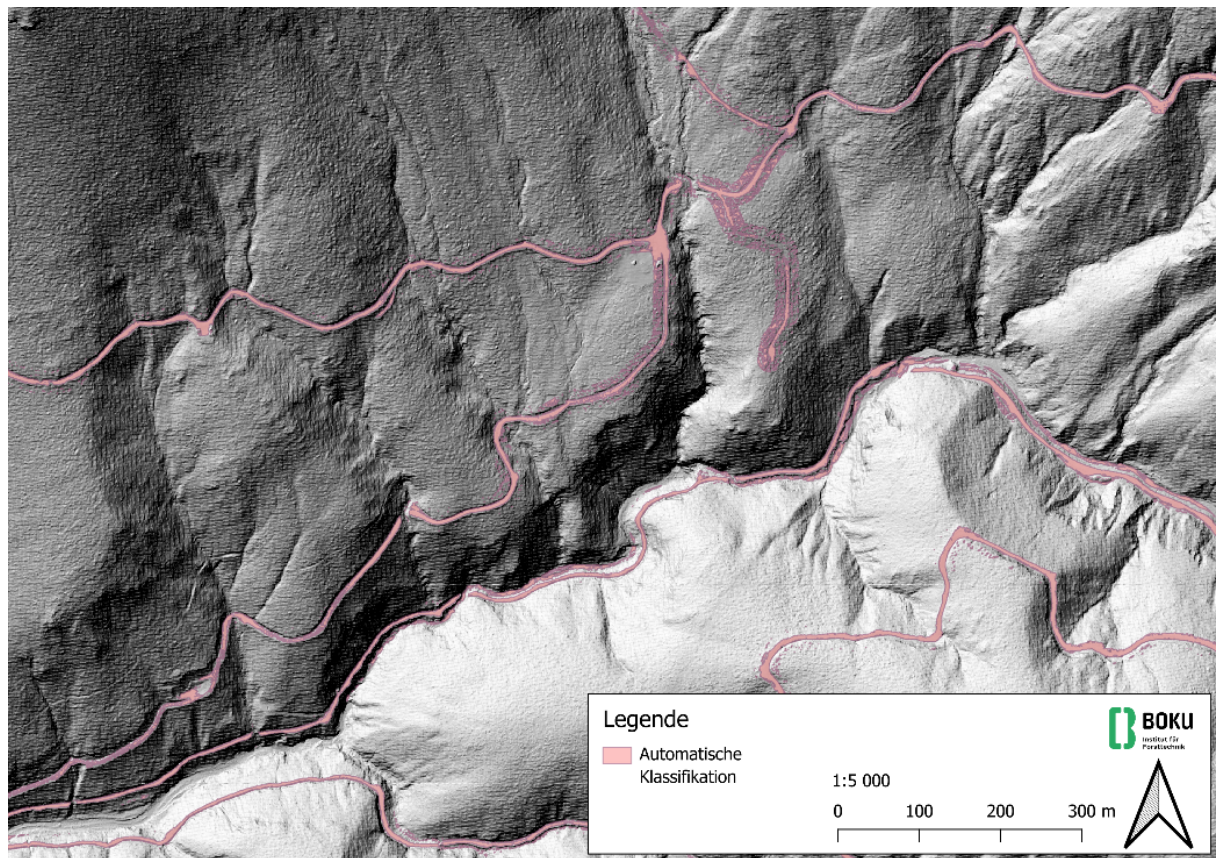


Abbildung 66 Beispiel zur automatisierten Klassifikation mittels OTB-Werkzeuge mit DGM im Hintergrund im Hintergrund



AP 5.3: Allgemeine Landnutzung/Landbedeckung-Gebirgshydrologie

Michael Aichinger, Jannis Aust, Christian Demmler, Andrew Giunta, Karl Hagen, Bernhard Kohl, Gerhard Markart, Klaus Suntinger, Sofie Wieshammer

Die Arbeit verfolgt das übergeordnete Ziel, die hydrologischen Eigenschaften und Abflussdynamiken eines Einzugsgebiets detailliert zu analysieren und modellieren zu können. Dazu werden zunächst die Landbedeckungseinheiten, insbesondere die waldfreien Bereiche, anhand hydrologischer Kriterien identifiziert und abgegrenzt. Diese Abgrenzungen werden anschließend durch Geländebegehungen überprüft und validiert, um eine fundierte Datengrundlage zu schaffen.

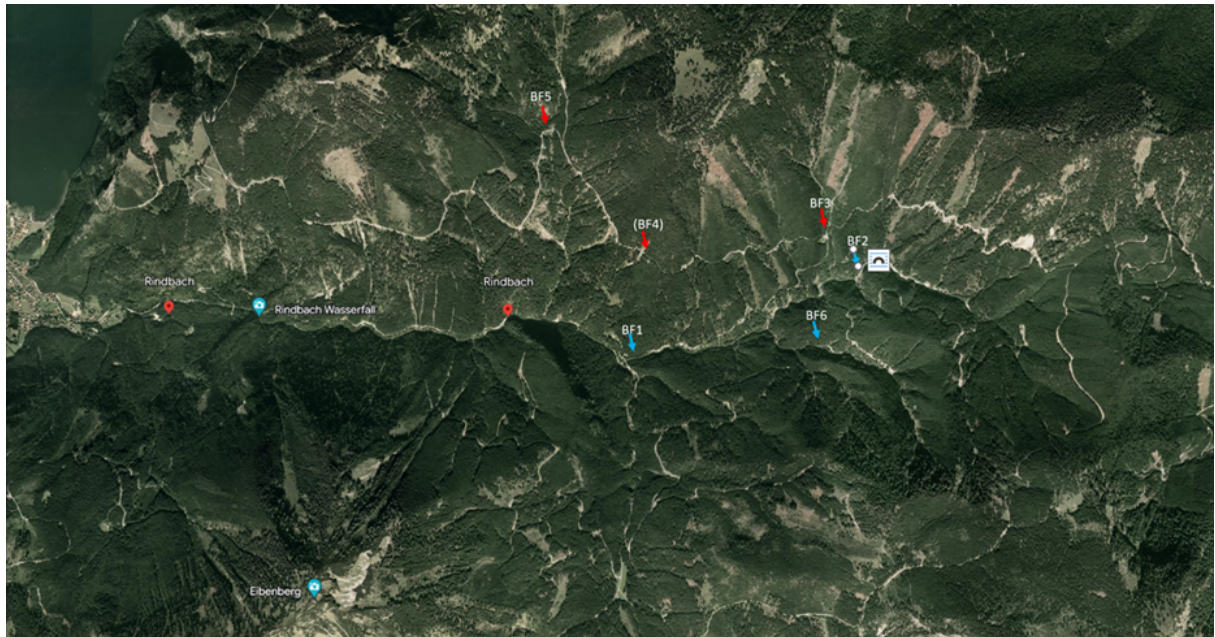
Im Rahmen der Untersuchungen werden Starkregensimulationen auf repräsentativen Landnutzungs- und Landbedeckungseinheiten durchgeführt. Mithilfe einer Großregenanlage werden dabei wichtige bodenphysikalische Eigenschaften der Testflächen erfasst, um die Infiltrations- und Abflussprozesse besser zu verstehen. Ergänzend dazu werden Abflussbeiwert- und Rauigkeitskarten erstellt, die zusammen mit der Erfassung von Gerinnecharakteristika, der Konnektivität und der Abflussreaktion der vorhandenen Gerinnesysteme als Grundlage für Niederschlag-Abfluss-Modellierungen (ZEMOKOST) dienen.

Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeit liegt auf der Durchführung von Fließhöhenmessungen. Diese dienen der Quantifizierung der Abflussreaktionen in verschiedenen Teileinzugsgebieten (TEZG) bei unterschiedlichen Niederschlagsereignissen. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen dazu beitragen, die hydrologischen Prozesse im Einzugsgebiet besser zu verstehen und die Modellierung der Abflussdynamik zu optimieren.

Beregnungen, Abflussbeiwertkarten

Bei mehrfachen Vorbegehungen (Herbst 2022, Frühjahr 2023) wurden sechs Beregnungsstandorte ausgewiesen, an denen auch ein ausreichendes Wasserangebot gesichert erschien (BF1-BF6 in Abbildung 67). Zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung Ende Juni 2023 führten die Bäche jedoch sehr wenig Wasser. Selbst Niederschläge in der Woche der Versuchsdurchführung brachten nicht genug Abfluss an den Flächen BF3 bis BF5, sodass nur die Beregnungen an den Standorten BF1, BF2 und BF6 (blaue Pfeile in Abbildung 67) durchgeführt werden konnten.

Abbildung 67 Berechnungsflächen im Rindbach – an den mit roten Pfeilen markierten Standorten waren Beregnungen mangels ausreichendem Wasserangebot nicht möglich, mit blauen Pfeilen markierte Standorte wurden beregnet.



Beregnungsversuche - Starkregensimulationen

Die Beregnungsexperimente (Abbildung 68) wurden auf drei 5 m (Schichtenlinie)×10 m (Falllinie) großen Parzellen (50 m²) durchgeführt, und mit einer mobilen Großregenanlage mit einer Niederschlagsintensität von ca. 100 mm/h (Markart et al., 2011a; Newesely et al., 2015) beregnet (genauere Angaben zur Anlage siehe Markart et al., 2004; Markart et al., 2011a; Mayerhofer et al., 2017). Diese Intensität ermöglicht den Vergleich mit mehreren hundert anderen Experimenten aus früheren Studien (Markart & Kohl, 1995, Markart et al., 2004, Mayerhofer et al., 2017, Meißl et al., 2023). Der erzeugte Abfluss wurde in einem Schlitz unter der Testfläche über Bleche entlang Auffangrinne in einer kalibrierten Sammelinheit gesammelt und gemessen (Mayerhofer et al., 2017; Meißl et al., 2023). Die Auffangbleche werden so nah wie möglich an der Oberfläche des Mineralbodens installiert, jedoch tief genug, um das gesamte Oberflächenwasser auch bei leicht welliger Oberfläche aufzufangen. Folglich misst diese Konstruktion sowohl den Oberflächenabfluss als auch den oberflächennahen Teil des Zwischenabflusses. Der gesamte Oberflächenabfluss geteilt durch den Gesamtniederschlag ergibt den dimensionslosen Gesamtkoeffizienten des Oberflächenabflusses (Ψ_{tot}). Idealerweise erreicht die Oberflächenabflussmenge während des Experiments ein konstantes Niveau. Für diese Phase kann der Oberflächenabflusskoeffizient für konstanten Abfluss (Ψ_{const}) bestimmt werden.

An jeweils zwei Profilen je Beregnungsplot wurden in Abhängigkeit von der Profilmächtigkeit Bodenfeuchtesonden (3-polige SOILMOISTURE®-TDR-Sonden mit 8 cm Elektrodenlänge) installiert und die Änderung der Bodenfeuchte im Zuge der Beregnung und noch mindestens bis 30 min nach Versuchsende gemessen. Die gewählten Einbautiefen waren 5 cm, 15 cm, 25 cm. Der Einbau in tieferen Bodenschichten war in den flachgründigen Böden nicht möglich.

Abbildung 68 Beispiel Beregnung / Starkregensimulation.



Bodenphysikalische Kennwerte

Von den drei Beregnungsflächen und einer zusätzlichen Fläche wurden die wichtigsten bodenphysikalischen Kennwerte bestimmt. Pro Tiefenstufe (TS) wurden bis maximal 20 cm Tiefe – so tief, wie eine Entnahme aufgrund des Skelettanteils möglich war – drei ungestörte, vertikal ausgerichtete Bodenproben (200 cm³ Zylinder) aus dem Mineralboden 0–10 cm (TS1), 10–20 cm (TS2) entnommen, ergänzt durch gestörte Proben derselben Tiefenstufen. An den Bodenproben wurden folgende Parameter erfasst: Skelettgehalt, Korngrößenverteilung des Feinbodens < 2 ym Ø, Gehalt an organischer Substanz, Gesamtporenvolumen, Schüttdichte und Porenverteilung (berechnet aus der Wasserspannungskurve (pF-Wert)), gesättigte hydraulische Leitfähigkeit mit einer Kapillarmethode unter Verwendung des KSAT-Geräts und Bodenfeuchte-Freisetzungskurven mit HYPROP 2 und dem WP4C (das den Trockenbereich misst) (Meter Group AG, 2023a; Meter Group AG, 2023b).

Hydrologische Wirkung seitlicher Zubringer

Da es im Rindbach in seitlichen Einzugsgebieten keine Pegel gibt, war der ursprüngliche Vorschlag, in den seitlichen Gerinnen Beregnungen durchzuführen, um abzuklären, wieviel Niederschlag in diesen Felsgerinnen bei Starkregen abfließt. Nach ersten Begehungen erschien es nicht zielführend auf Felsstrecken zu beregnen und damit 100 % Oberflächenabfluss zu produzieren. Zudem würden Beregnungen in diesen Strecken keine Information über die zeitliche und mengenmäßige Reaktion von Teileinzugsgebieten auf natürliche (Stark-)Regenereignisse liefern. Andererseits war die Anlage richtiger Abflusspegel aus zeitlichen, administrativen, Arbeits- und Kostengründen nicht möglich. Berührungslose Pegel erfordern definierte, sich nicht verändernde Gerinnequerschnitte über eine bestimmte Strecke. Solche Gerinneabschnitte sind an den seitlichen Zubringern im Rindbach nicht bzw. nur schwer zu finden und geeignete Strecken oft nur stark erschwert zugänglich. Messtrecken für berührungslose Messungen der Fließhöhe (Ultraschall) und der Fließgeschwindigkeit (Radar) an definierten Gerinnequerschnitten hätten aufwendig bautechnisch gestaltet bzw. adaptiert werden müssen und wären an entsprechende langfristige Verwaltungs- und Genehmigungsabläufe gebunden.

Fließhöhenmessungen

Ab Juli 2023 wurden daher Ultraschall-Abflusshöhensensoren an den Standorten R2 und R3 zu Testzwecken installiert (Abbildung 69). Nachdem diese problemlos funktionierten und gut reproduzierbare Messwerte lieferten und auch die Übertragung über LoRaWAN problemlos lief, wurden im Mai 2024 vier zusätzliche Abflusshöhensensoren (R1, R4, R5 und R6),

sowie ein weiteres Gateway zur Sicherung der Datenübertragung im Teileinzugsgebiet R5 installiert. Dieses Gateway wurde Ende 2024 abgebaut und 2025 nicht mehr installiert, weil keine Verbesserung der Datenübertragung erreicht worden war und das vorhandene Gateway für die Daten-Übertragung ausreichte. Die Lage der sechs Sensoren im Rindbach-EZG ist aus Abbildung 69 ersichtlich, Bilder von den Fließhöhenmesspunkten sind in Abbildung 70 zusammengestellt. Die Teileinzugsgebiete 1 und 4 werden jeweils nur am untersten Punkt mit Abflusshöhensensoren gemessen, in den Teileinzugsgebieten 2 und 6 befinden sich jeweils zwei Abflusshöhensensoren. Diese „doppelte“ Beobachtung soll Differenzierungen im Abflussverhalten zwischen unterschiedlichen Gerinneabschnitten ermöglichen.

Abbildung 69 Lage der Abflusshöhensensoren und der zugehörigen Teileinzugsgebiete

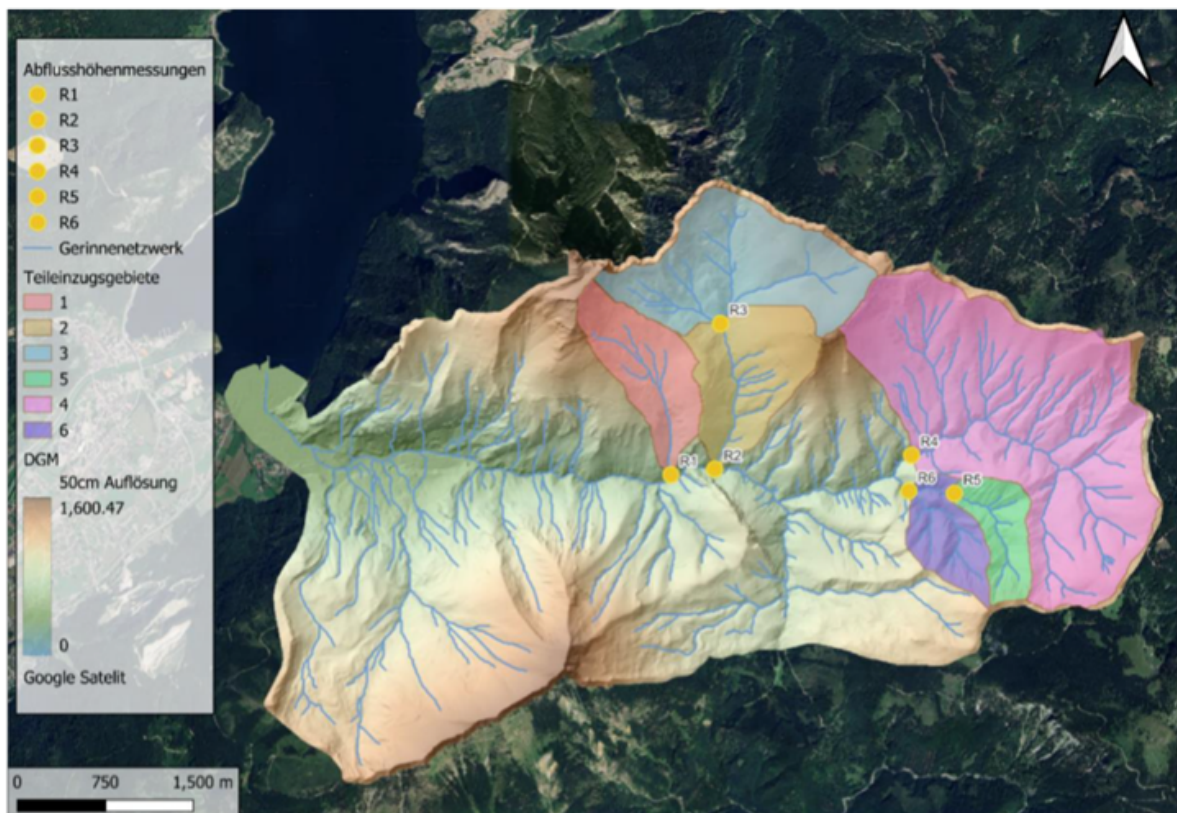
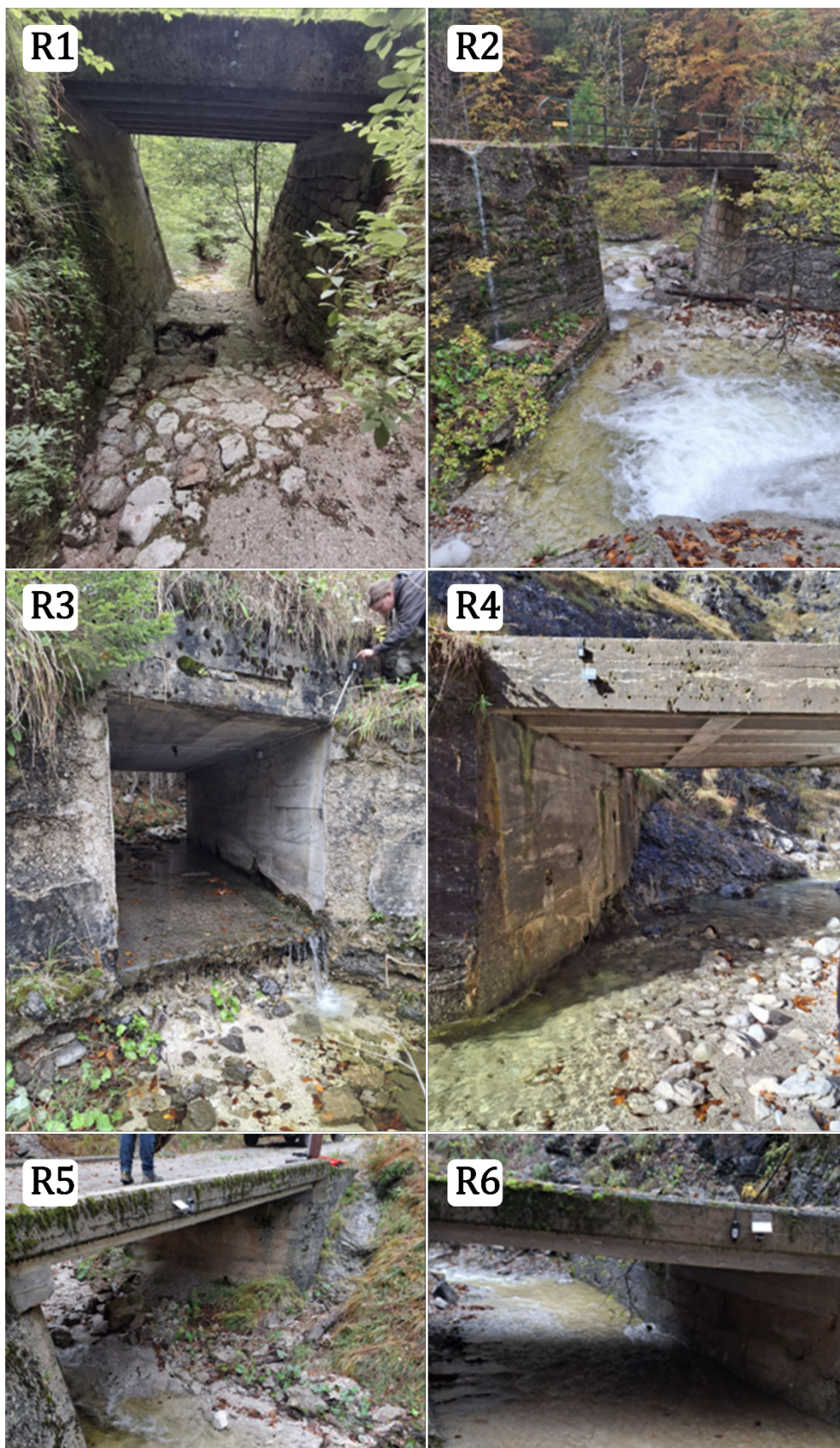


Abbildung 70 Fließhöhen-Messpunkte im MEZG-Rindbach (Sensoren R1 bis R6)



Hydrologische Kennwerte

Das Gerinnenetzwerk wurde im Zuge des Projektes zur Verfügung gestellt. Gerinneabschnitte mit temporärer Gewässerführung wurden gezielt ergänzt. Auf Basis der Gerinnenetzwerke werden folgende Kennwerte ermittelt:

- Gerinnelänge
- Gerinnedichte
- Gerinneneigung

Diese Kennwerte werden für jedes Teileinzugsgebiet berechnet. Die Längen der Gerinne wurden als horizontal projizierte Längen ermittelt. Die Gerinne-Neigung ergibt sich aus der Höhendifferenz des Gerinneabschnittes und dessen horizontal projizierter Länge. Bei Anordnung mehrerer Gerinneabschnitte hintereinander wurden die Neigungen über ein gewichtetes Mittel auf Basis deren horizontaler Länge berechnet. Zusätzlich werden auch die Teileinzugsgebietseigenschaften, welche im Niederschlag-Abfluss-Simulationsprogramm HEC-HMS verwendet werden, ermittelt:

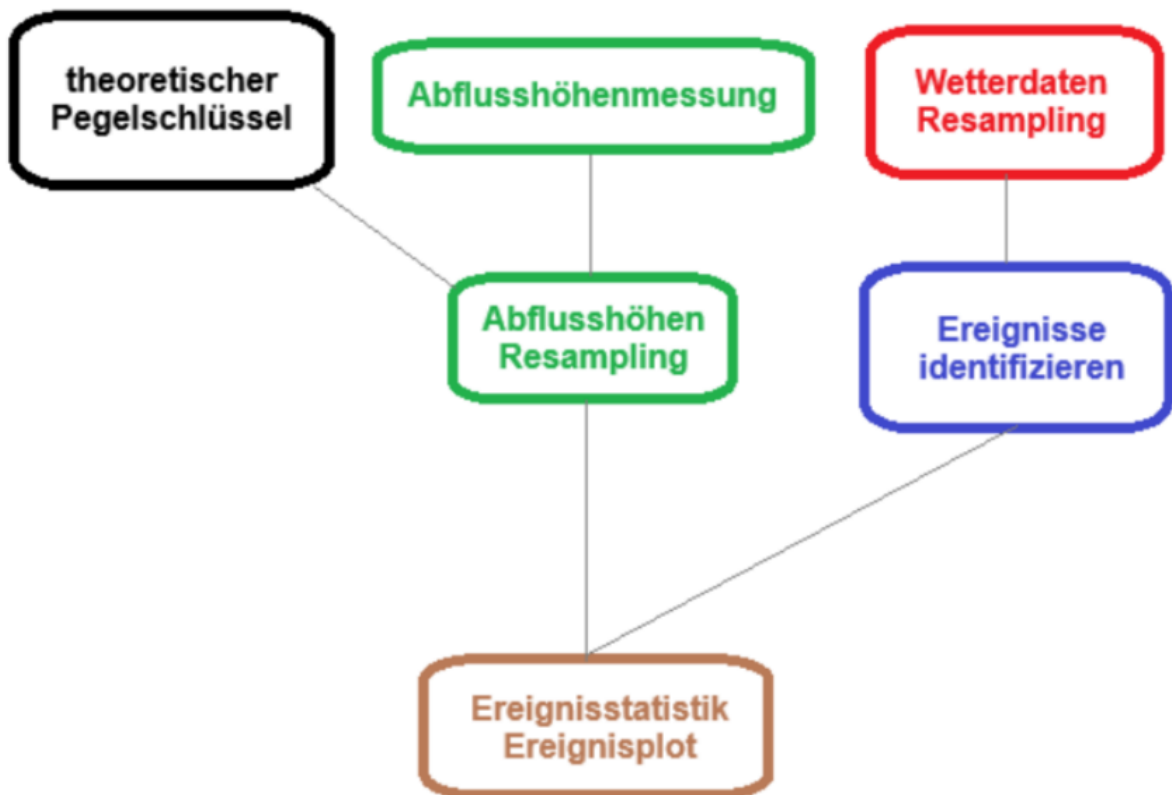
- Längste Fließweglänge (engl. *Longest Flowpath Length*)
- Entlastungsverhältnis (engl. *Relief Ratio*)
- Dehnungsverhältnis (engl. *Elongation Ratio*)

Das Entlastungsverhältnis errechnet sich durch Division der Höhendifferenz mit dem längsten Fließweg. Das Dehnungsverhältnis ist eine dimensionslose Kennzahl zur Kategorisierung der allgemeinen Form eines Teileinzugsgebietes. Es ist das Verhältnis zwischen dem Durchmesser eines Kreises mit der gleichen Fläche wie das Teileinzugsgebiet und der Teileinzugsgebietslänge. Dehnungsverhältniswerte liegen typischerweise zwischen $\sim 0,2$ und $1,0$, wobei niedrigere Werte längliche Teileinzugsgebiete und Werte nahe 1 kreisförmige Teileinzugsgebiete darstellen (USACE Hydrologic Engineering Center, 2025).

Datenaufbereitung

Die Daten der Abflusshöhensensoren und des Wasserkontaktsensors wurden vor Ort als .csv Datei ausgelesen. Fehler, z.B. Formatfehler, wurden in einem ersten Schritt korrigiert und Zeitreihen auf jenen Zeitraum gekürzt, für den auch kontinuierliche Abflusshöhenmessungen vorliegen. Die gesamte Datenaufbereitung wurde in Python in unterschiedlichen Skripten durchgeführt. Eine Übersicht über die einzelnen Skripte gibt Abbildung 71.

Abbildung 71 Für die Abflussdaten-Auswertung erstellte Python-Skripte

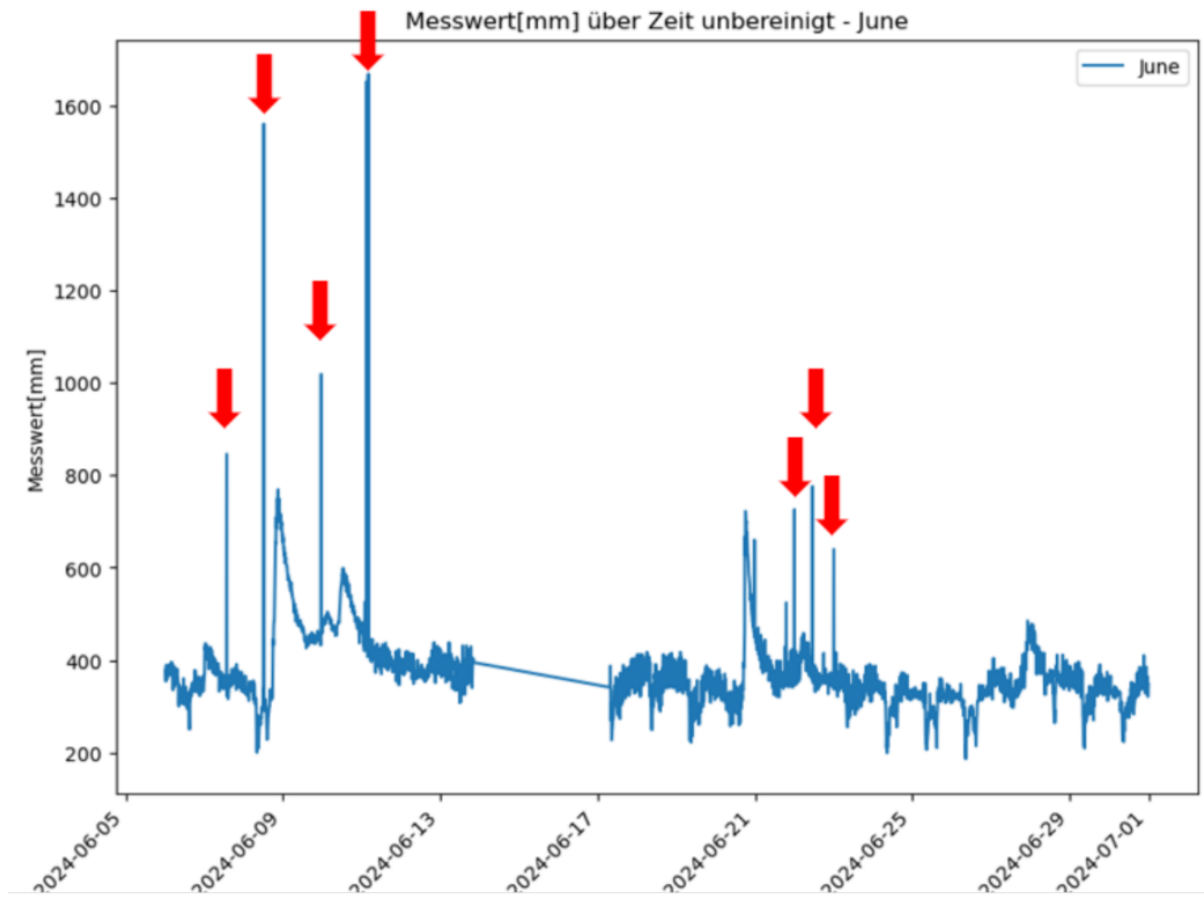


Datenbereinigung

Die Rohdaten der Abflusshöhenmessungen werden importiert, über die Installationshöhe in einen Wasserstand umgerechnet und für jeden Monat und Sensor visuell dargestellt. In Abbildung 72 sind die Rohdaten des Sensors R2 für den Monat Juni dargestellt. Darin sind die Messfehler sehr gut zu erkennen.

Die Installationshöhe kann sich durch Erosion bzw. Auflandung der Gerinnesohle verändern, weshalb diese für jedes Jahr ermittelt wurde. Die Sensoren R1, R3 und R6 befinden sich in einem Betonquerschnitt, wo die Sohle als fix zu betrachten ist. Dies ist bei den Sensoren R2, R4 und R5 nicht der Fall und die Installationshöhe kann sich laufend ändern.

Abbildung 72 Rohdaten der Abflusshöhenmessung am Sensor R2 für den Juni 2024, mit Messfehlern



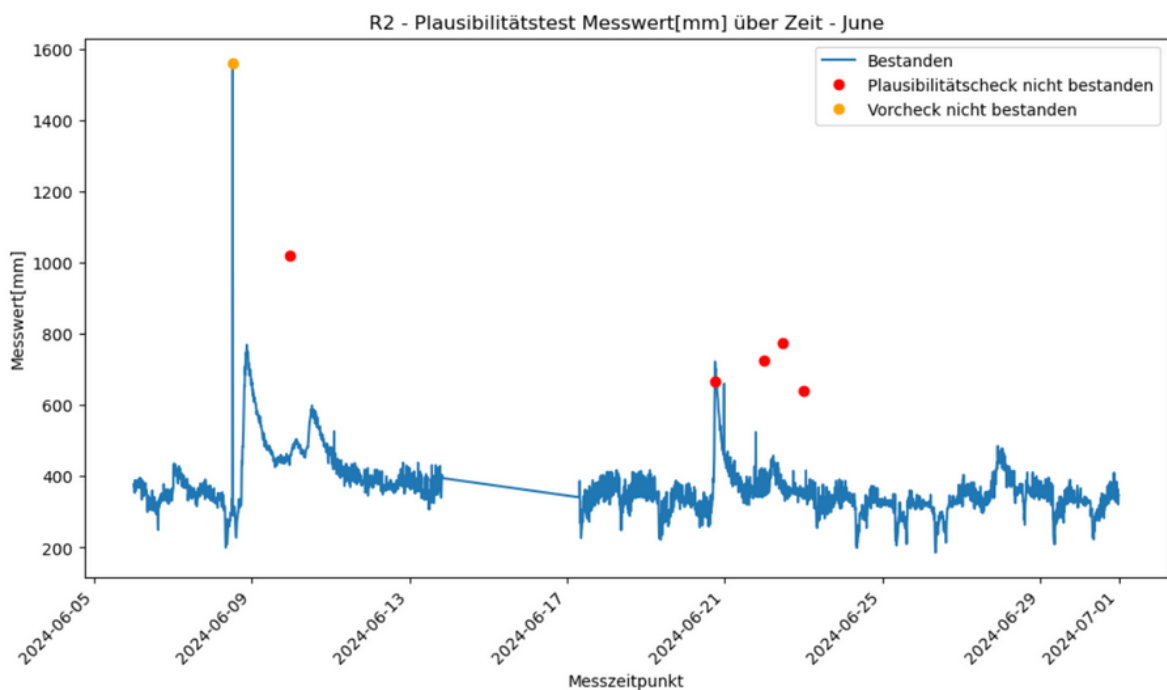
Die Messfehler wurden anschließend durch zwei „Tests“ identifiziert. In einem ersten Test, dem „Vorcheck“, wurde anhand der Ganglinie der Rohdaten ein Grenzwert (1200 mm) definiert, welcher im gesamten Messzeitraum nicht natürlich, sondern nur durch offensichtliche Messfehler überschritten wurde. Überschreitet ein Messwert diesen Grenzwert, so ist der Vorcheck nicht bestanden und der Wert wird gelöscht. Für den zweiten Test, dem Plausibilitätscheck, wurde zusätzlich auch die Ganglinie des Niederschlags der Wetterstation groß verwendet. Der Plausibilitätscheck prüft, ob der Anstieg des Messwertes (Anstieg des Wasserstandes) in Relation mit der zuvor gefallenen Niederschlagsmenge steht. Je mehr Niederschlag davor fällt, umso mehr kann der Wasserstand innerhalb eines Zeitintervalls ansteigen. Konkret wurde dabei die Niederschlagssumme in mm 24 h davor ermittelt und mit 10 multipliziert. Um auch einen geringen Anstieg des Wasserstandes in niederschlagsfreien Perioden zu erlauben, wurde zusätzlich ein Basiswert von 150 mm in den Test implementiert.

$$\text{max. Anstieg pro Intervall} = 150 \text{ mm} + 24\text{h-Niederschlagssumme [mm]} \times 10$$

Somit erhöht sich der mögliche Anstieg des Wasserstandes pro mm Niederschlagsmenge um einen Zentimeter.

Übersteigt der Anstieg des Wasserstandes diesen Grenzwert, so wird davon ausgegangen, dass es sich dabei um einen Messfehler handelt, der Plausibilitätscheck ist nicht bestanden und der Wert wird gelöscht. Die Ergebnisse des Vorchecks bzw. Plausibilitätscheck wurden zur Überprüfung anschließend noch für jeden Monat und Sensor visualisiert. In Abbildung 73 sind die Ergebnisse für den Sensor R2 (Monat Juni) dargestellt. Der orange markierte Messwert stellt einen Messfehler dar, welcher durch den Vorcheck detektiert wurde, während die rot markierten bereits entfernten Werte, den Plausibilitätscheck nicht bestanden haben.

Abbildung 73 Ergebnisse des Vorchecks und Plausibilitätscheck des Sensors R2 für Juni 2024



Temperaturkompensation

Während eines Ereignisses sind die Temperaturschwankungen gering und in der Ganglinie des Wasserstandes sind keine temperaturbedingten Schwankungen ersichtlich. Da für die Auswertung nur die Ereignisse von Bedeutung sind und die Gefahr bestand, dass durch die Temperaturkorrektur die Messwerte noch weiter verfälscht werden, wurde von einer Temperaturkorrektur abgesehen.

Theoretischer Pegelschlüssel

Ein Pegelschlüssel bzw. Wasserstands-Durchflussbeziehung (Abflusskurve) ist der Zusammenhang zwischen gemessenen Durchflüssen und den zugehörigen beobachteten Wasserständen. Er lässt sich durch Durchflussmessungen zu unterschiedlichen Wasserständen erstellen und ist für ein definiertes Querprofil gültig. Die Beziehung ist daher aufgrund der Erosions- und Sedimentationsprozesse im Gerinne nur für einen kurzen Zeitraum gültig (Maniak, 2017). Da die Erstellung einer solchen Abflusskurve für sechs Querprofile mit sehr viel Aufwand verbunden wäre, wurden die Durchflüsse für einen bestimmten Wasserstand auf der Basis von unterschiedlichen Fließgesetzen ermittelt. Dafür wurde im Zuge der Feldarbeiten jedes Querprofil aufgenommen und die Rauigkeiten (K_{st} , d_{90}) abgeschätzt. Die Erstellung des theoretischen Pegelschlüssels erfolgte in Python. Dabei wird für jedes Querprofil ein theoretischer Pegelschlüssel erstellt.

Für die Berechnung wird das gesamte Querprofil in Bereiche mit unterschiedlichen Rauigkeiten (= Segmente) unterteilt. Die Berechnung der Teildurchflüsse erfolgt dabei für jedes Segment. Die Teildurchflüsse werden dabei mit folgenden Formeln berechnet:

- normale Strickler Formel (Strickler, 1923)
- Strickler Formel mit Berücksichtigung der Rauigkeit zwischen den Segmenten (Sigloch, 2012)
- Rickenmann (1996)

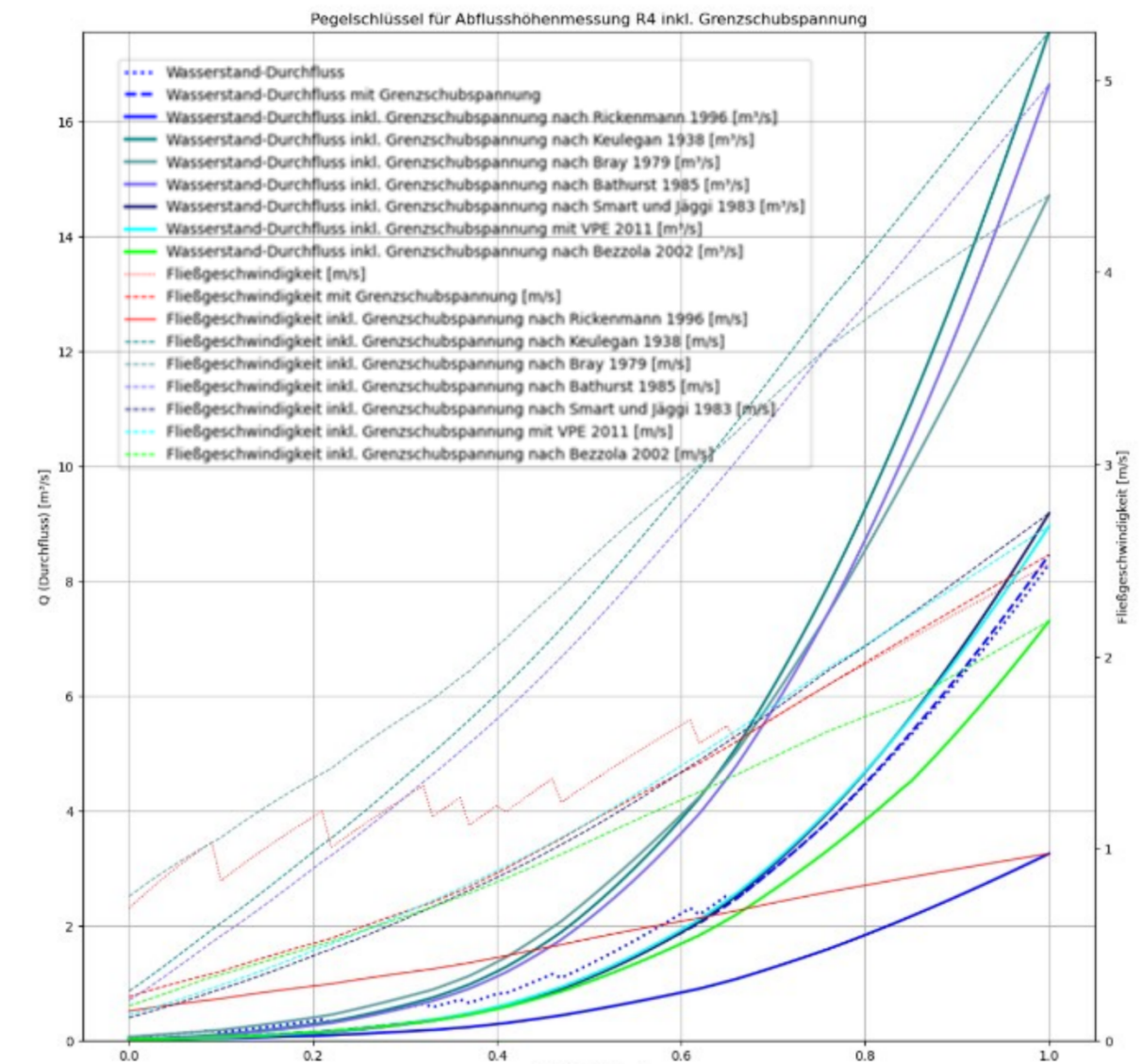
Logarithmische Fließwiderstände nach:

- Keulegan (1938)
- Bray (1979)
- Bathurst (1985)
- Smart und Jäggi (1983)
- Bezzola (2002)

- Variables Potenzgesetz (VPE) (Rickenmann & Recking, 2011)

Durch Aufsummieren der einzelnen Teildurchflüsse der Segmente ergibt sich der theoretische Pegelschlüssel, welcher für alle Querprofile erstellt wurde. In Abbildung 74 ist der theoretische Pegelschlüssel für den Sensor R4 zu sehen. Der Wasserstand bezieht sich dabei immer auf die Messlotrechte der Abflusshöhenmessung, welche nicht am tiefsten Punkt liegen muss.

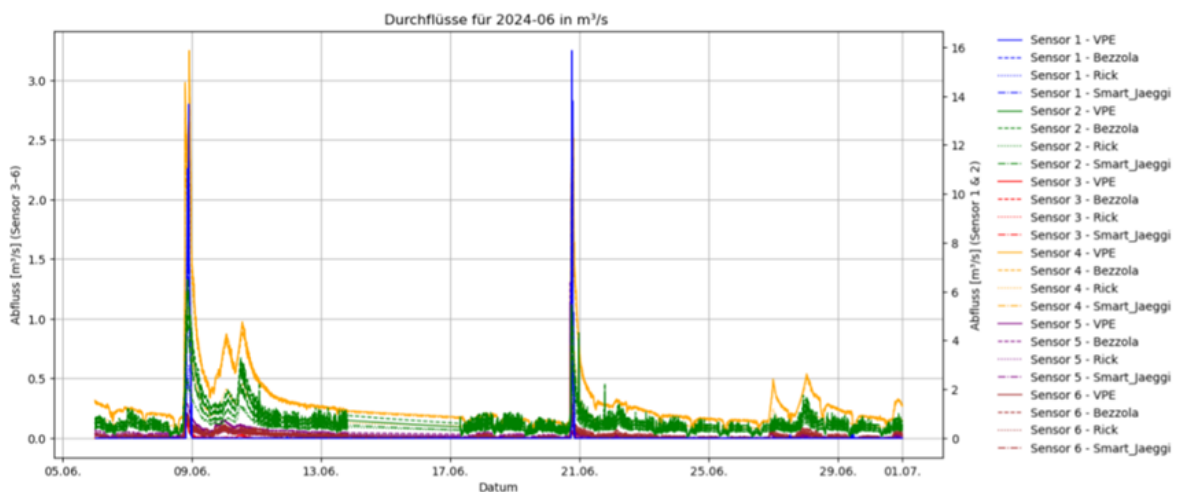
Abbildung 74 Theoretische Pegelschlüssel nach verschiedenen Formelansätzen für den Sensor R4



Datenresampling

Im Datenresampling werden zunächst alle bereinigten Abflusshöhenmessungen geladen und auf ein einheitliches Messintervall von einer Minute linear interpoliert, um die spätere Datenbearbeitung und Analyse zu vereinfachen. Die Daten werden anschließend für jeden Monat zur visuellen Kontrolle geplottet. Anschließend werden die Wasserstände über den theoretischen Pegelschlüssel in Durchflüsse umgerechnet. Dabei wurden nur die Abflusskurven nach Bezzola (2002), Rickenmann (1996), Smart & Jäggi (1983) und dem Variablen Potenzgesetz (Rickenmann & Recking, 2011) verwendet, da diese realistische Fließgeschwindigkeiten ergaben. Vor allem ältere Ansätze führten zu einer Überschätzung der Fließgeschwindigkeit in steileren Gerinnen und damit zu einem zu hohen Durchfluss. Die Ganglinien der mit unterschiedlichen Methoden berechneten Durchflüsse wurden zur visuellen Kontrolle monatsweise geplottet. Ein Beispielsplot für den Monat Juni ist in Abbildung 75 angeführt.

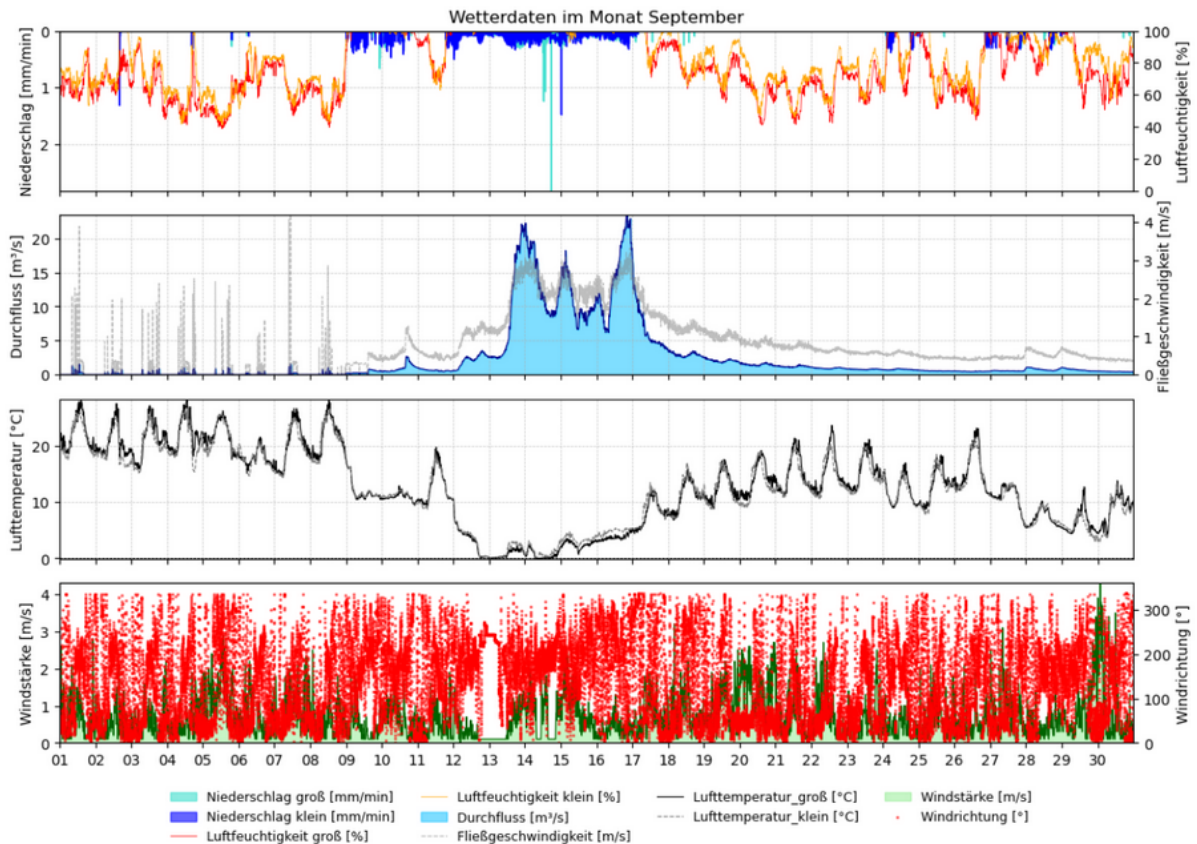
Abbildung 75 Durchflüsse der Sensoren 1 bis 6 für den Monat Juni berechnet mit den Ansätzen von Bezzola (2002), Rickenmann (1996), Smart & Jäggi (1983) und dem Variablen Potenzgesetz (Rickenmann und Recking, 2011)



Niederschlag und weitere meteorologische Daten

Der Niederschlag wurde von den beiden Wetterstationen in einem Messintervall von einer Minute in der Einheit mm/min erfasst. Für die folgenden Berechnungen werden diese Werte ohne weitere Korrekturen verwendet. Abbildung 76 enthält einen Beispielsplot der Wetterdaten (September 2024).

Abbildung 76 Beispielsplot – meteorologische Daten für September 2024



Mit den Meteorologischen Daten werden auch Daten zur Bodenfeuchte und der Bodentemperatur in den Tiefen 10 cm, 20 cm, 30 cm und 40 cm erfasst. Je höher die Sättigung des Bodens, desto weniger Niederschlag geht durch Infiltration verloren und desto mehr wird direkt als Abfluss wirksam. Die Bodenfeuchte erhöht sich durch Niederschlag; wie schnell sie wieder abnimmt, ist abhängig von der Beschaffenheit des Bodens, der Geologie, aber auch von der Lufttemperatur, Windverhältnissen und Luftfeuchte, welche die Evaporation beeinflussen. Der Wasserentzug durch Transpiration tritt vor allem während der Vegetationsperiode auf.

Auf Basis dieser Überlegungen und dem gemessenen Verlauf der Bodenfeuchte wurden vier unterschiedliche Vorfeuchteindizes definiert, welche den Systemzustand vor einem Niederschlagsereignis definieren, um diesen später analysieren zu können (siehe Tabelle 13).

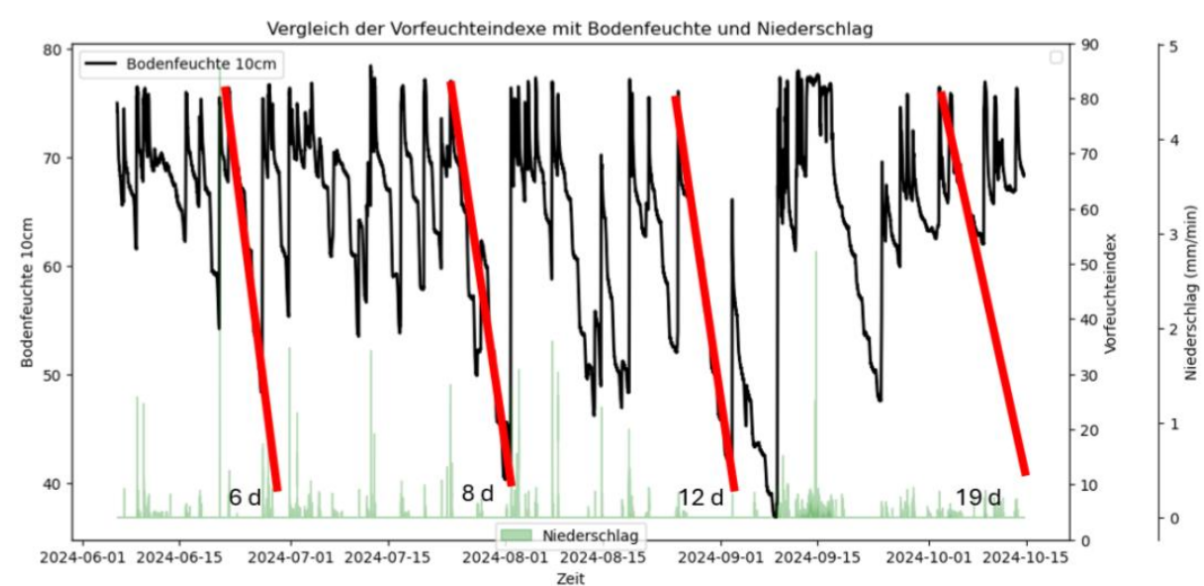
Tabelle 13 Beschreibung der Vorfeuchteindizes für versch. Systemzustände

Vorfeuchteindex	Beschreibung
1	Dieser Vorfeuchteindex wird außerhalb der Vegetationsperiode angewendet, wenn die Abnahme der Bodenfeuchte nur sehr langsam erfolgt. Typisch dabei ist eine kühle, feuchte Witterung.
2	Dieser Vorfeuchteindex wird angewendet, wenn die Abnahme der Bodenfeuchte eher langsam erfolgt. Typisch dabei ist eine kühle, feuchte Witterung.
3	Dieser Vorfeuchteindex wird angewendet, wenn die Abnahme der Bodenfeuchte eher schnell erfolgt. Typisch dabei ist eine warme, trockene Witterung.
4	Dieser Vorfeuchteindex wird innerhalb der Vegetationsperiode angewendet, wenn die Abnahme der Bodenfeuchte sehr schnell erfolgt. Typisch dabei ist eine warme, trockene Witterung.

Die Vorfeuchteindizes werden durch Aufsummieren der Niederschlagsmengen vor dem betrachteten Zeitpunkt und anschließender spezifischer Gewichtung je nach Index berechnet. Dabei unterscheiden sie sich in der Art der Gewichtung sowie in der Länge des betrachteten Zeitraumes.

Abbildung 77 zeigt den Verlauf der Bodenfeuchte in 10 cm Tiefe im Jahr 2024. Daraus ist ersichtlich, dass der Rückgang der Bodenfeuchte im Juni deutlich rascher erfolgt als im Oktober. Für die Ermittlung der Vorfeuchte im Oktober ist daher ein längerer Zeitraum maßgebend als für die Vorfeuchte im Juni.

Abbildung 77 Entwicklung der Bodenfeuchte Juni bis Oktober 2024



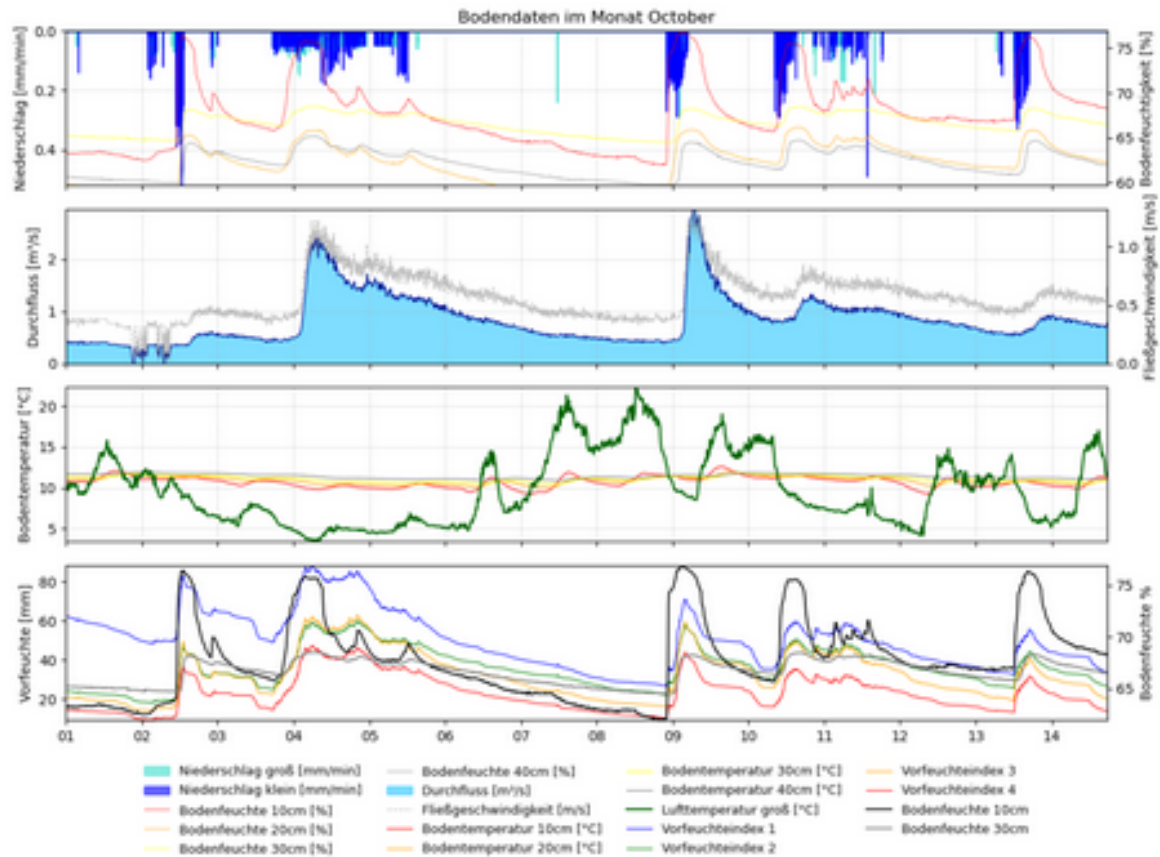
Auf Basis der Beobachtung der Bodenfeuchte wurden die unterschiedlichen Betrachtungszeiträume und deren Gewichtungsfaktoren festgelegt (Tabelle 14). In der ersten Spalte ist dabei die Länge des Zeitfensters, in dem die Niederschlagsmenge aufsummiert wird, angegeben. In der zweiten Spalte „Kum. Zeit“ sind die aufsummierten Zeitfenster angegeben. Die unterschiedlichen Vorfeuchteindizes werden kontinuierlich als Ganglinie in einem Intervall von einer Minute berechnet. So beginnt z.B. das Zeitfenster 3 mit einer Dauer von 20 h erst 4 h vor dem betrachteten Zeitpunkt und endet 24 h (1 Tag) nach dem betrachteten Zeitpunkt.

Tabelle 14 Gewichtungsfaktoren Niederschläge unterschiedlicher Dauer für die Berechnung der verschiedenen Vorfeuchte-Indizes

Zeitfenster	Kum. Zeit	Gewichtungsfaktoren			
		VF-Index 1	VF-Index 2	VF-Index 3	VF-Index 4
1h	1h	4,00	3,00	4,00	3,00
3h	4h	2,60	2,20	2,50	2,10
20h	1 Tag	1,60	1,40	1,60	1,30
1 Tag	2 Tage	0,90	0,90	0,90	0,75
1 Tag	3 Tage	0,80	0,75	0,75	0,50
1 Tag	4 Tage	0,70	0,65	0,50	0,40
1 Tag	5 Tage	0,60	0,50	0,40	0,30
2 Tage	7 Tage	0,50	0,35	0,30	0,10
2 Tage	9 Tage	0,40	0,20	0,10	
2 Tage	11 Tage	0,30	0,10		
3 Tage	14 Tage	0,20	0,05		
3 Tage	17 Tage	0,15			
4 Tage	21 Tage	0,10			
4 Tage	25 Tage	0,05			

Die Vorfeuchteindizes, die Bodenfeuchte und die Bodentemperatur wurden für Mitte 2023 bis Oktober 2024 monatsweise geplottet. In Abbildung 78 ist als Beispiel der Plot für den Monat Oktober 2024 angeführt.

Abbildung 78 Niederschlagsverlauf, Durchfluss-Pegel Rindbach, Bodenfeuchte und Vorfeuchteindizes für den Monat Oktober 2024



Ereignis-Identifikation

Für die Ableitung der Niederschlagsereignisse aus den Niederschlagsdaten beider Wetterstationen werden diese zuerst auf Stundenwerte (mm/h) zusammengefasst. Es wird nur jener Ausschnitt der Zeitreihe verwendet, für den auch Abflusshöhenmessungen vorliegen. Die Ereignisse selbst werden jedoch, unter der Annahme, dass sich die beiden Zeitreihen nicht wesentlich voneinander unterscheiden, nur mithilfe der Daten der großen Wetterstation ermittelt. Für die Ereignischarakteristika werden anschließend wieder beide Wetterstationen verwendet.

Ein Ereignis wird folgendermaßen definiert:

- Eine Intensität von 2 mm/h wird in mind. einer Stunde überschritten
- Fällt 6 Stunden lang kein Niederschlag, beginnt ein neues Ereignis

- Beträgt die regenlose Zeit zwischen zwei Niederschlägen weniger als 6 Stunden, so werden die beiden Niederschläge zu einem Ereignis zusammengefasst

Ereignisse ohne Messwerte, aufgrund von Ausfällen der Abflusshöhenmessung, werden ausgeschieden.

Berechnung der Ereignis-Charakteristika

Aus den Niederschlagsdaten wurden die bereits bekannten Parameter nochmals, dieses Mal auf Basis der Ganglinie mit dem Zeitintervall von einer Minute, berechnet (Niederschlagssumme [mm], maximale Intensität [mm/h], mittlere Intensität [mm/h], Regenspau-
sen [h], Regenanteil [%], Niederschlagsspende [m^3/s pro km^2]). Auch aus den Zeitreihen der Luftfeuchte, Lufttemperatur und Windstärke wurden über die Ereignisdauer verschiedene Kennwerte ermittelt. Um den Systemzustand besser beurteilen zu können, sind auch die Werte der Vorfeuchteindizes bzw. die Bodenfeuchtigkeit in unterschiedlichen Tiefen zu Ereignisbeginn und Ereignisende angegeben.

Aus den über die Abflusshöhen berechneten Durchflüssen an den Messstellen Q1 bis Q6 bzw. dem gemessenen Durchfluss am Pegel Rindbach wurden Kennwerte des Abflusses ermittelt (Tabelle 15).

Tabelle 15 Ereignischarakteristika – Kennwerte Abfluss

Kennwerte Abfluss	Einheit	Beschreibung
Basisabfluss	m^3/s	10% Quantil der ermittelten Abflüsse vor Ereignisbeginn, für alle 6 Sensoren mit je 3 unterschiedlichen Methoden
Abflussfracht	m^3	Die über die Ereignisdauer aufsummierte Abflussfracht, für alle 6 Sensoren mit je 3 unterschiedlichen Methoden, abzüglich der Fracht des Basisabflusses
Spitzenabfluss	m^3/s	Der über die Ereignisdauer ermittelte Spitzenabfluss, für alle 6 Sensoren mit je 3 unterschiedlichen Methoden, inklusive des Basisabflusses
Mittlerer Ereignisabfluss	m^3/s	Abflussfracht / Ereignisdauer (ohne Basisabfluss)
Fläche	km^2	Fläche des Einzugsgebietes des Sensors
Anteil am EZG	%	Anteil der Teileinzugsgebietsfläche am Einzugsgebiet des Pegels Rindbach

Kennwerte Abfluss	Einheit	Beschreibung
Abflussspende	m ³ /s pro km ²	Der errechnete Durchfluss wurde über die Teileinzugsgebietsfläche aus Gründen der Vergleichbarkeit auf 1 km ² normiert. Zusätzlich wird auch der Maximalwert und Mittelwert über die Ereignisdauer hinweg angegeben
Abflussbeiwert	-	Der Abflussbeiwert wird als Ganglinie kontinuierlich durch Division der Abflussfracht mit der Niederschlagsfracht errechnet. Zusätzlich wird der Abflussbeiwert zum Zeitpunkt des Auftretens des Spitzenabflusses und zu Ereignisende angegeben
Frachtanteil	%	Anteil der Abflussfracht and der Gesamtabflussfracht des Pegels Rindbach

In der Folge wurden – um einen besseren Vergleich der Ganglinien der Teileinzugsgebiete mir unterschiedlichen Größen zu ermöglichen – die Durchfluss-Ganglinien [m³/s] über der Einzugsgebietsfläche in eine Abflussspende [m³/s pro km²] umgerechnet. Zudem wurden die Abflussfracht-Summenkurven bzw. Niederschlagsfracht-Summenkurven auf die gesamte Ereignisfracht bezogen:

$$\text{prozentueller Wert zum Zeitpunkt } i = \frac{\text{Fracht zum Zeitpunkt } i}{\text{Gesamtfracht}}$$

Dadurch lässt sich die Transformation des Niederschlages zu Abfluss abbilden. Ein Anstieg der Niederschlagsfracht verursacht zeitlich verzögert auch einen Anstieg in der Abflussfracht.

Auswertung der Ereignisse

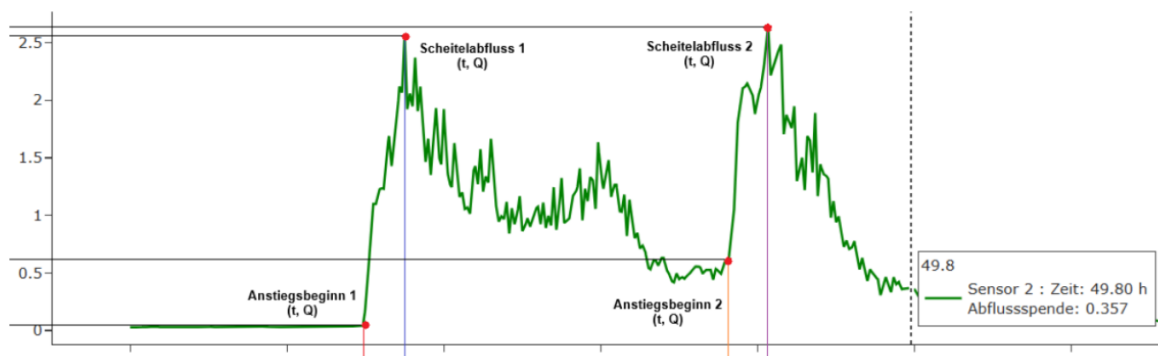
Um die Auswertung übersichtlich zu halten, wurden nur mehr die Daten der Wetterstation groß verwendet, da diese näher an den Teileinzugsgebieten liegt. Zudem wurden nur die nach dem Variablen Potenzgesetz (VPE) nach Rickenmann & Recking (2011) berechneten Durchflüsse verwendet.

Die Abflussganglinien wurden auch hinsichtlich ihrer zeitlichen Komponente analysiert. Für diese Auswertung wurden jedoch nur 15 Ereignisse mit für die Auswertung geeigneter Ganglinie untersucht. Der Beginn des Anstieges bzw. der Scheitel in den Ganglinien musste gut erkennbar sein.

Für die Auswertung wurde aus den Ereignisplots der Zeitpunkt des Anstieges sowie der Zeitpunkt des Spitzenabflusses für die Sensoren 1 bis 6 sowie für den Pegel Rindbach ausgelesen. Der zugehörige Spitzenabfluss und die bereits gefallene Niederschlagsmenge zum Zeitpunkt des Anstieges der Niederschlagssummenkurve bzw. zum Zeitpunkt des maximalen Niederschlags wurde ebenfalls ermittelt.

Ein Beispiel für diese Auswertung ist in Abbildung 79 zu sehen.

Abbildung 79 Beispiel für die Auswertung der Ganglinien mit zwei Abflussspitzen (Ereignis 4, Sensor 2)



Die Auswertung der Niederschlagsganglinien erfolgte analog zu dem oben beschriebenen Beispiel. Aus der Zeitdifferenz zwischen Anstiegsbeginn der Niederschlagskurve und Anstieg der Abflussganglinie des jeweiligen Sensors lässt sich die Geschwindigkeit des Prozesses der Abflussbildung ermitteln. Diese Zeitdauer beinhaltet den Abfluss außerhalb des Gerinnes ab dem Zeitpunkt des Beginns des Niederschlages und den Abfluss im Gerinne bis hin zum Pegel. Aus der Zeitdifferenz zwischen dem Zeitpunkt der maximalen Niederschlagsintensität bzw. dem stärksten Anstieg der Niederschlagssummenkurve und dem Zeitpunkt des Scheitelabflusses des jeweiligen Sensors lässt sich ableiten, wie schnell eine Niederschlagspitze bei bereits vorhandener Vorbefeuchtung durch den Vorniederschlag in der Abflussganglinie sichtbar wird. Aus den Zeitdifferenzen des Anstieges bzw. des Scheitelabflusses zwischen zwei benachbarten Pegeln im selben Gerinneabschnitt lassen sich zudem die Laufzeiten im Gerinne und somit eine mittlere Fließgeschwindigkeit ermitteln. Diese Auswertung wird jedoch stark von der Zugrichtung der Niederschlagsereignisse beeinflusst. Zudem wurde auch noch die mittlere Steigung der Abflussganglinie von Anstiegsbeginn bis Spitzenabfluss ermittelt.

Ermittelte Durchflüsse – Plausibilitätsprüfung

Durch den Pegel Rindbach am unteren Ende des Einzugsgebietes ist es möglich, die Plausibilität der ermittelten Abflüsse zu überprüfen. Dies jedoch unter vielen Annahmen, z.B.:

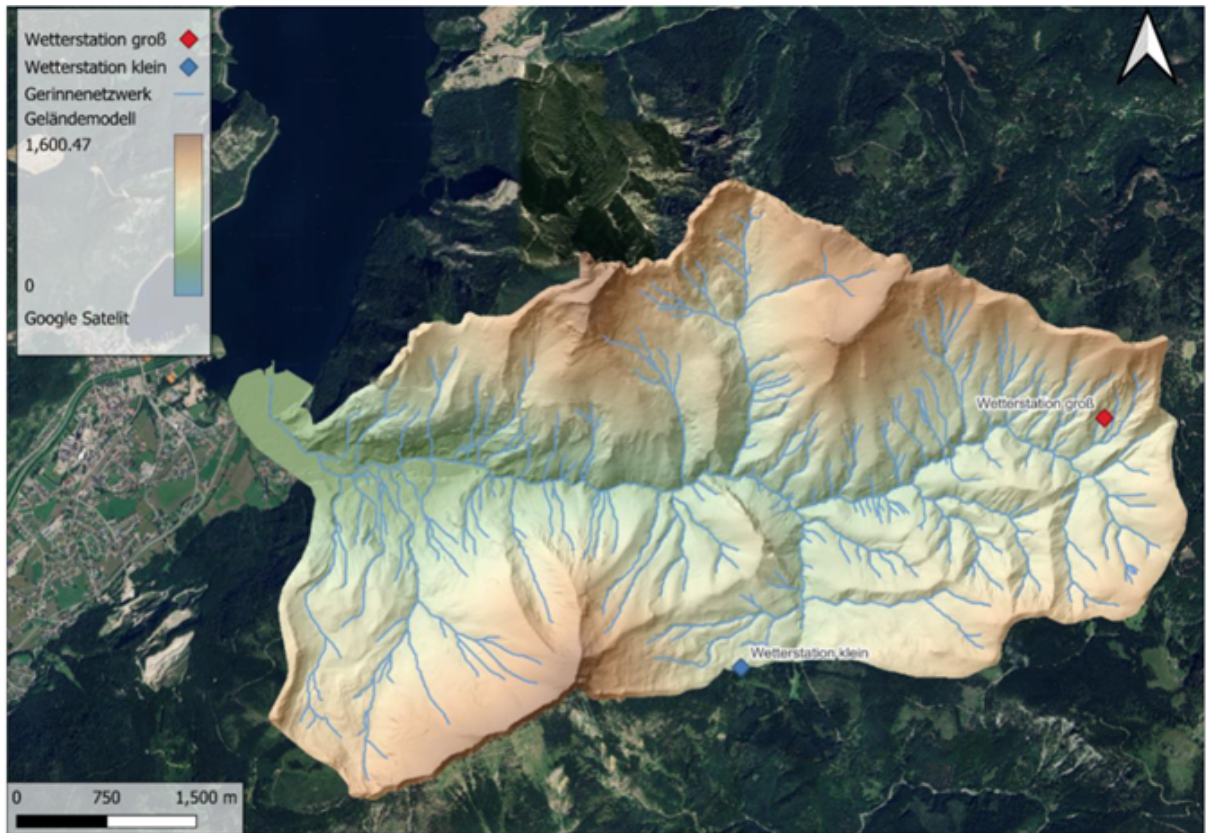
- Ein zur Gebietsfläche proportionaler Beitrag der Teileinzugsgebiete zur gesamten Abflussfracht.
- Das topografische Einzugsgebiet stimmt mit dem hydrologischen Einzugsgebiet überein.
- Es kommt zu keiner übermäßigen Speicherung und späterem Abfließen des Niederschlages außerhalb des Ereignisfensters.

Basis für diesen Auswertungsschritt ist die gemessene Abflussfracht am Pegel Rindbach, welche allerdings mit Unsicherheiten behaftet ist. Die Summe der Abflussfrachten der beobachteten Teileinzugsgebiete dividiert durch die Abflussfracht am Pegel Rindbach sollte dabei dem Verhältnis aus Summe der beobachteten Teileinzugsgebietsflächen zu der Einzugsgebietsfläche des Pegels Rindbach entsprechen. Jedenfalls sollte die Summe der Abflussfrachten der beobachteten Teileinzugsgebiete die Abflussfracht des Pegels Rindbach nicht übersteigen.

Meteorologische Daten

Im Rahmen des Waldfonds-Forschungsprojektes MEZG-Rindbach wurden von der WLW, Sektion Oberösterreich, zwei Wetterstationen (Wetterstation groß und Wetterstation klein) im Einzugsgebiet des Rindbaches installiert (Abbildung 80). Für die Auswertungen in den folgenden Kapiteln finden vor allem die Niederschlagsdaten Verwendung (Aufzeichnung in 1 min-Auflösung) und hier vor allem Daten der Wetterstation groß, da diese nach Einschätzung der Sachbearbeiter die Zugrichtung von Niederschlagsereignissen besser abbildet.

Abbildung 80 Lage der Wetterstationen im MEZG-Rindbach



Datenauswertung

Berechnungen, Bodenphysik

An der Beregnungsfläche BF1 (Lage siehe Abbildung 67) wurde der höchste Abfluss gemessen ($\Psi_{\text{tot}} = 0,12$, $\Psi_{\text{const}} = 0,25$) – siehe Abbildung 81. D.h., diese Fläche ist der Anleitung von Markart et al. (2004, 2011) der Abflussbeiwertklasse 3 (0–30 % Oberflächenabfluss) zuzuordnen. Der Oberflächenabfluss beginnt ca. 17 min nach Beregnungsbeginn. Bei einem natürlichen Starkregenereignis würde auch auf dieser Fläche der Niederschlag eine Zeit lang gepuffert. Die Bodenfeuchte steigt nach Beregnungsbeginn rasch auf Werte um und über 60 Vol%. Das Speichervermögen des flachgründigen Bodens ist damit weitgehend ausgeschöpft.

Am Standort BF2 ist der Oberflächenabfluss mit $\Psi_{\text{tot}} = 0,03$, $\Psi_{\text{const}} = 0,07$ sehr gering (Abflussbeiwertklasse 2). Die Bodenfeuchte steigt hier von Ausgangswerten zw. 22 und 25 Vol% lediglich auf Maximalwerte zw. 30 und 40 Vol%.

Auf BF3 ist der Oberflächenabfluss vernachlässigbar ($\Psi_{\text{tot}} = 0,01$, $\Psi_{\text{const}} = 0,03$). Dieser ist primär dem Direkteintrag in die Auffangeinheit am Bodenschlitz im Zuge der Beregnung geschuldet. BF3 wäre der Abflussbeiwertklasse 0 zuzuordnen.

Im Zuge der Beregnungsexperimente wurde auf den Testflächen auch der oberflächennahe Zwischenabfluss (ZA) gemessen (Ausleitung am Boden des Auffangschlitzes und Quantifizierung über 10-Lt-Messkübel). Mit dieser Methodik können aber nur Teile des ZA erfasst werden, weil der Boden des Auffangschlitzes mit dem Material vor Ort nicht vollkommen abgedichtet werden konnte. Auf BF1 lag PSI_int_ZA = Abflussbeiwert des ZA bei Abflusskonstanz bei 0,05, PSI_tot_ZA = Abflussbeiwert des ZA gesamt bei 0,02. PSI_int_ZA für BF6 war 0,08, PSI_tot_ZA lag um 0,06 (siehe Abbildung 81). Auf BF2 wurde kein ZA gemessen.

Aufgrund des hohen Grobanteils war die Bestimmung von bodenphysikalischen Kenngrößen an ungestörten Zylinderproben für BF1 und BF6 nur für die Tiefenstufe 0–10 cm und für BF2 nur bis 20 cm Tiefe möglich. Alle Beregnungsflächen weisen einen hohen Grobanteil auf (Abbildung 82). Bei BF1 ist der Grobanteil mit ca. 60 Vol% am niedrigsten.

Abbildung 81 Ergebnisse der Starkregensimulationen (Abbildungen auf der linken Seite) und Änderung der Bodenfeuchte durch die Beregnungen (Bilder auf der rechten Seite) für die Beregnungsflächen 1–3. Die Lage der Beregnungsflächen im Projektgebiet ist aus Abbildung 6 ersichtlich. PSI_int = Ψ_{const} , PSI_tot = Ψ_{tot} , PSI_int_ZA = Abflussbeiwert des ZA bei Abflusskonstanz, PSI_tot_ZA = Abflussbeiwert des ZA gesamt. iT = Niederschlag. P2 5 = Bodenfeuchtesonde am Profil 2 in der Testfläche in 5 cm Tiefe, u.s.w.

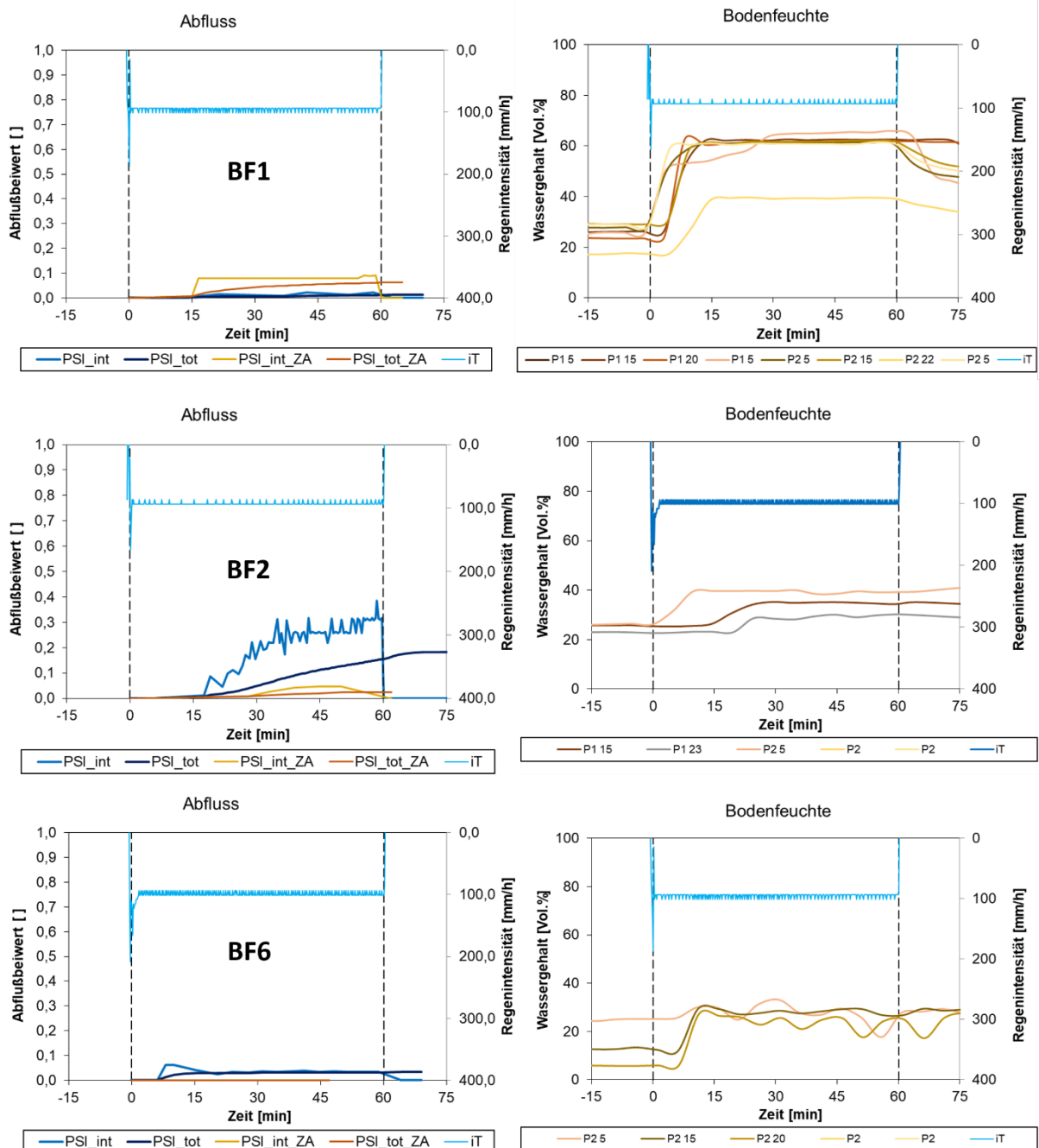
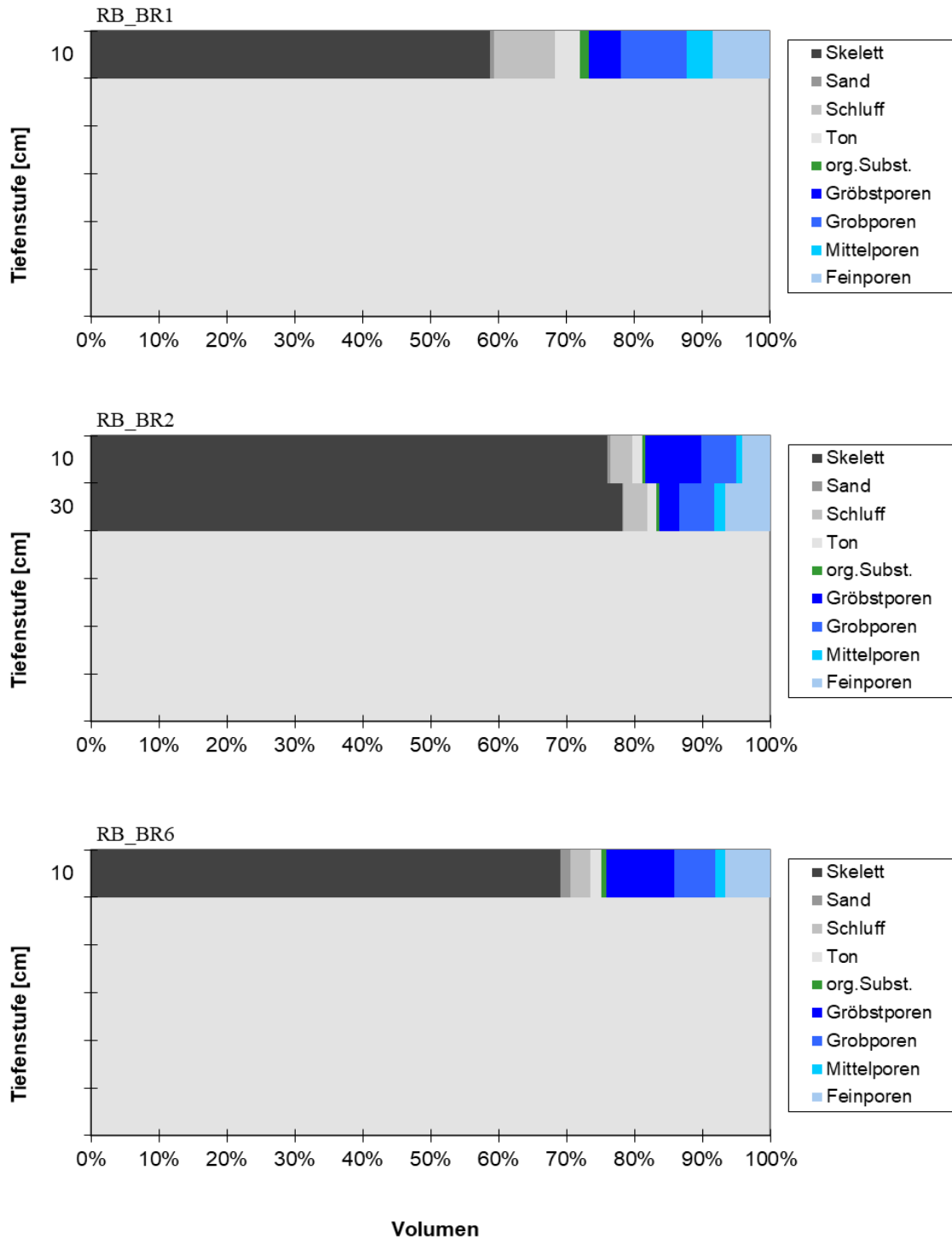


Abbildung 82 Profilgraphen – volumsgerechte Verteilung von Bodenskelett > 2 mm, Durchmesser, Feinboden (Sand, Schluff Ton), organischer Substanz und der Porenvolumina für die Beregnungsflächen BF1 (oben), BF2 (Bildmitte) und BF6 (unten)



Schluff- und Tonanteil sind auf BF1 gemeinsam > 10 Vol%. Dagegen ist der Gröbtporenanteil (Poren < 50 µm Durchmesser) in der obersten Tiefenstufe geringer als an den anderen

Plots (BF2, BF6 – siehe Abbildung 82). Diese beiden Faktoren und ein über die Fläche ziehender Wildwechsel (lokale Kompaktion) könnten Ursache für die geringere Infiltrationsrate (Versickerung pro Zeiteinheit) und den höheren Oberflächenabfluss gegenüber BF2 und BF6 sein.

Landnutzungskarte, Abflussbeiwertkarte

Die in Abbildung 83 angeführte Landnutzungskarte basiert auf manuellen Abgrenzungen am Orthofoto im GIS und terrestrischen Abgrenzungen im Gelände durch B. Kohl und im Rahmen der Masterarbeit von S. Wieshammer.

Die Abflussbeiwertkarte (Abbildung 84) baut auf der Landbedeckungskarte auf – hier fließen auch die Ergebnisse der Beregnungen ein. Höhere Abflussbeiwerte (Abflussbeiwertklasse 5 – orange – 51–75 % Oberflächenabfluss) sind vor allem auf den steilen Felsflächen mit sehr geringmächtiger Bodenauflage zu erwarten. Es dominieren Flächen der Abflussbeiwertklasse 3 (hellgrün, 0–30 % Oberflächenabfluss). Die Abflussbeiwertkarte wird im Zuge der Masterarbeit S. Wieshammer noch weiter verfeinert. Beide Karten stellen essenzielle Grundlagen für die Beschreibung des Abflussverhaltens und anschließende Berechnungen mit dem N/A-Modell ZEMOKOST dar.

Abbildung 83 Karte der Landnutzung – aus Wieshammer (2025 – in Vorbereitung)

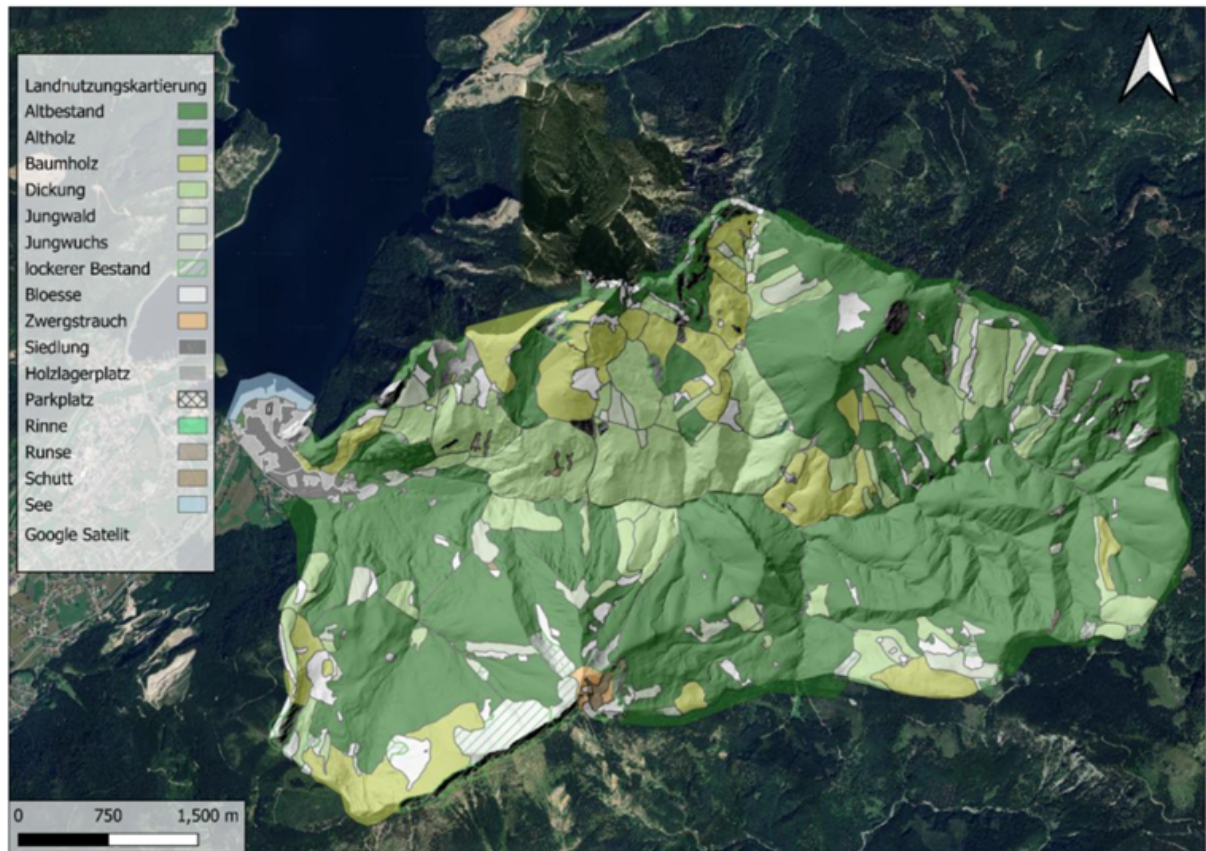
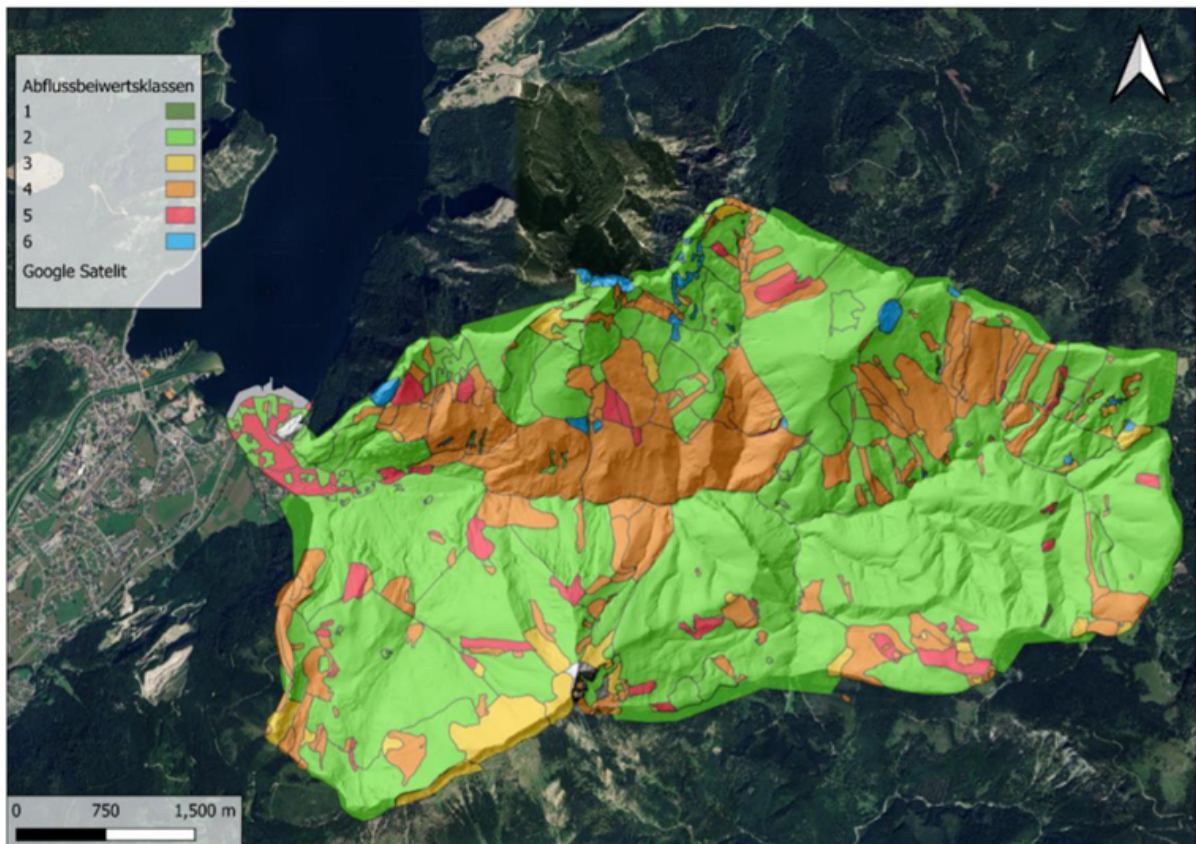


Abbildung 84 Abflussbeiwertkarte MEZG-Rindbach – aus Wieshammer (2025 – in Vorbereitung)



Ergebnisse der Auswertungen der Fließhöhenmessungen

Kennwerte der Teileinzugsgebiete

Für jedes Teileinzugsgebiet wurden geomorphologische, hydrologische und geologische Kennwerte bestimmt. Die Flächen der Teileinzugsgebiete sowie des gesamten Einzugsgebietes (Bezugspunkt Pegel Rindbach) sind in Tabelle 16 aufgelistet. Das Einzugsgebiet bis zum Pegel Rindbach hat eine Fläche von 21.49 km². Das gesamte Einzugsgebiet vom Rindbach umfasst jedoch eine Fläche von etwa 23.4 km². Der Teil unterhalb des Rindbach-Pegels wird in den Auswertungen nicht berücksichtigt.

Tabelle 16 Flächenanteile der Teileinzugsgebiete in Relation zum Gesamteinzugsgebiet (bis zum Pegel Nicolai-Brücke)

Pegel Rindbach	TEZG1	TEZG 2	TEZG 3	TEZG 4	TEZG 5	TEZG 6
21,49 km ²	0,84 km ²	2,68 km ²	1,65 km ²	4,23 km ²	0,45 km ²	0,95 km ²
100 %	3,89 %	12,48 %	7,68 %	19,69 %	2,08 %	4,44 %

Topographische Kennwerte

Die topographischen Kennwerte beschreiben die Höhenlage der Teileinzugsgebiete und deren Hangneigungen. Eine Auflistung ist in Tabelle 17 ersichtlich.

Tabelle 17 Übersicht über die topographischen Kennwerte der Teileinzugsgebiete

Kennwert	TEZG1	TEZG 2	TEZG 3	TEZG 4	TEZG 5	TEZG 6
Mittlere Höhe [m.ü.A]	1.075	1.144	1.229	1.052	989	962
Max. Höhe [m.ü.A]	1.541	1.537	1.537	1.440	1.246	1.247
Min. Höhe [m.ü.A]	633	667	939	751	824	770
Höhendifferenz [m]	908	870	598	689	421	477
Mittlere Neigung [°]	29,8	30,8	28,5	30,1	34,1	33,4

Hydrologische Kennwerte

Die Teileinzugsgebiete weisen hinsichtlich ihrer hydrologischen Kennwerte deutliche Unterschiede auf, wobei insbesondere Teileinzugsgebiet 4 mit hoher Gerinnelänge und Fließweglänge sowie der niedrigen Fließwegneigung auffällt (Tabelle 18).

Tabelle 18 Übersicht über die hydrologischen Kennwerte der Teileinzugsgebiete

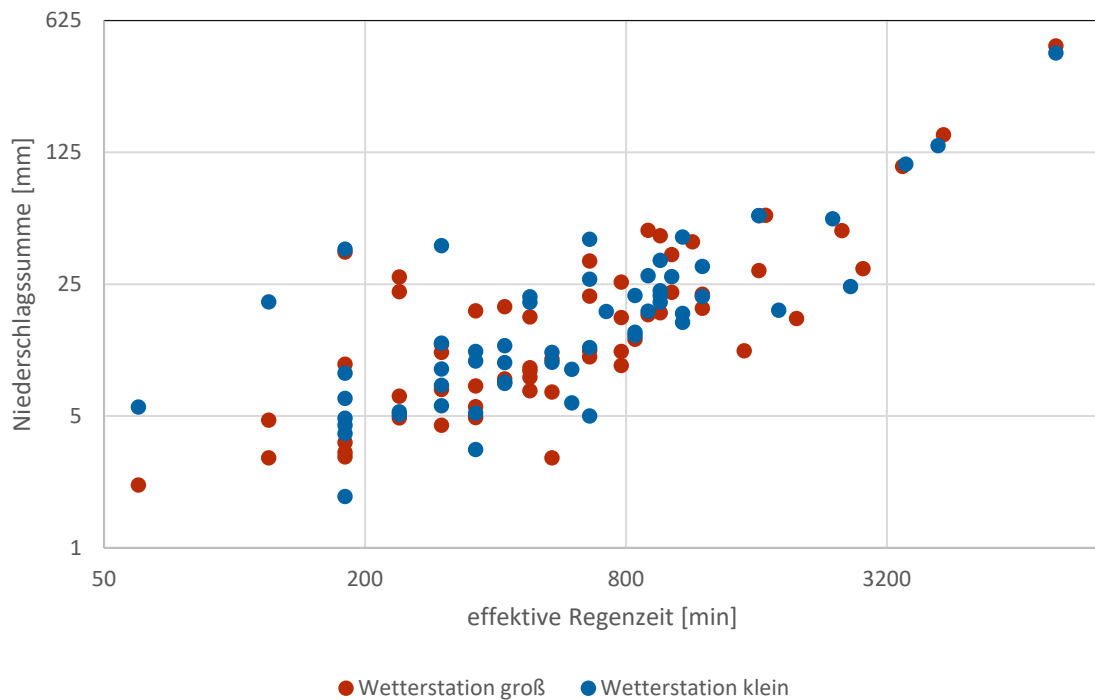
Kennwert	TEZG 1	TEZG 2	TEZG 3	TEZG 4	TEZG 5	TEZG 6
Gerinnelänge [m]	3.068	9.913	6.247	22.339	1.903	4.711
Gerinnedichte [km/km ²]	3,67	3,70	3,79	5,28	4,25	4,94
Längste Fließweglänge [km]	1,98	3,11	1,67	3,40	1,33	1,78
Längste Fließweglänge Neigung [°]	24,5	13,7	16,1	8,5	17,5	14,9
Entlastungsverhältnis [-]	0,458	0,279	0,356	0,202	0,315	0,268
Dehnungsverhältnis [-]	0,521	0,595	0,865	0,681	0,567	0,620

Identifizierte Abflussereignisse

In Summe konnten mit dem beschriebenen Schema 58 Ereignisse identifiziert werden. 5 Ereignisse wurden aufgrund von technischen Problemen bei der Abflusshöhenmessung wieder ausgeschieden (rot markiert). Somit wurden 53 Ereignisse für die Auswertung verwendet, wobei 15 auf das Jahr 2023 und 38 auf das Jahr 2024 fallen. Jene aus dem Jahr 2023 beinhalten nur 2 Sensoren (R2, R3) und jene aus dem Jahr 2024 6 Sensoren (R1 bis R6) (siehe Abbildung 85).

In Abbildung 85 ist für jedes der 58 Ereignisse die Niederschlagssumme von beiden Wetterstationen geplottet. Diese Abbildung lässt einen bedingten Rückschluss zu, wo das Zentrum der Niederschlagszelle während des Ereignisses und wie heterogen die Überregnung war.

Abbildung 85 Niederschlagssumme [mm] und effektive Regenzeit in Minuten der in Tabelle 19 angeführten Ereignisse, logarithmische Darstellung



Ausgewählte Ereignisse

Die identifizierten Ereignisse wurden anschließend für die weiteren Auswertungen weiter gefiltert. In einer visuellen Überprüfung der Ereignisplots wurde bewertet, ob eine Reaktion der Abflussganglinien auf den Niederschlag sichtbar ist oder nicht. Der Datensatz „Q sichtbar“ umfasst folglich alle Ereignisse, in denen eine Reaktion erkennbar ist. Für die Auswertung der zeitlichen Komponente des Niederschlages, welche manuell erfolgte, war es notwendig, diesen Datensatz noch weiter zu reduzieren. Die Filterung erfolgte dabei nach den in Kapitel 2.2.11 genannten Kriterien. Eine Übersicht über den Datensatz „Q sichtbar“ (38 Ereignisse) ist in Tabelle 19 zu sehen, wobei die Ereignisse, welche für die manuelle Auswertung verwendet wurden (15 Ereignisse), rot markiert sind.

Tabelle 19 Übersicht über den Datensatz „Q sichtbar“ und die Ereignisse, welche für die manuelle Auswertung verwendet wurden (rot markiert)

ID	Ereignisbeginn	Ereignisende	Niederschlags- summe [mm]	Mittlere Intensität [mm/h]	Max. Intensität [mm/h]	Regenzeit [min]
1	7/25/2023 17:00	7/26/2023 23:00	48,33	1,56	7,13	900
2	7/30/2023 6:00	7/31/2023 5:00	21,65	0,90	6,08	660
3	8/1/2023 8:00	8/2/2023 7:00	16,66	0,69	5,1	780
4	8/4/2023 17:00	8/8/2023 7:00	154,76	1,74	10,22	4320
5	8/9/2023 8:00	8/10/2023 14:00	35,91	1,16	10,85	1020
6	8/15/2023 20:00	8/16/2023 4:00	3,03	0,34	2,14	180
9	8/27/2023 16:00	8/30/2023 17:00	105,23	1,42	11,5	3480
10	9/13/2023 16:00	9/14/2023 17:00	41,98	1,61	9,03	1140
14	10/27/2023 0:00	10/27/2023 19:00	25,64	1,28	9,79	780
15	11/2/2023 15:00	11/4/2023 6:00	21,78	0,68	3,30	1200
16	11/4/2023 22:00	11/5/2023 13:00	57,91	1,45	7,75	1680
18	11/7/2023 16:00	11/8/2023 8:00	10,02	0,63	2,39	540
19	6/6/2024 22:00	6/7/2024 6:00	10,31	0,61	2,95	660
20	6/8/2024 18:00	6/9/2024 13:00	3,62	0,40	2,89	180
21	6/9/2024 17:00	6/10/2024 23:00	33,18	1,66	13,62	660
22	6/20/2024 17:00	6/21/2024 1:00	22,14	0,71	6,58	1200
25	6/26/2024 21:00	6/27/2024 6:00	37,01	4,11	28,07	180
27	6/27/2024 11:00	6/28/2024 16:00	22,79	2,28	11,86	240
28	6/27/2024 11:00	6/28/2024 16:00	17,65	0,59	4,28	960
29	6/30/2024 17:00	7/2/2024 13:00	29,55	0,66	9,07	1620
32	7/12/2024 12:00	7/12/2024 21:00	27,36	2,74	18,65	240
33	7/12/2024 23:00	7/13/2024 9:00	10,89	0,99	4,12	300
38	7/23/2024 23:00	7/24/2024 11:00	18,97	1,46	11,96	420
40	8/1/2024 17:00	8/3/2024 2:00	45,15	1,33	19,12	960
42	8/5/2024 5:00	8/5/2024 18:00	7,88	0,56	3,84	420
43	8/7/2024 15:00	8/8/2024 2:00	18,09	1,51	13,58	360
44	8/8/2024 11:00	8/8/2024 19:00	9,40	1,04	8,90	180

ID	Ereignisbeginn	Ereignisende	Niederschlags- summe [mm]	Mittlere Intensität [mm/h]	Max. Intensität [mm/h]	Regenzeit [min]
46	8/18/2024 15:00	8/19/2024 15:00	22,64	0,91	4,90	1020
48	8/25/2024 12:00	8/26/2024 6:00	11,00	0,58	4,46	780
49	9/9/2024 0:00	9/11/2024 2:00	48,10	0,94	6,01	2520
50	9/11/2024 18:00	9/17/2024 10:00	459,63	3,35	11,67	7860
52	9/26/2024 20:00	9/28/2024 6:00	18,64	0,53	3,20	1200
53	9/28/2024 12:00	9/29/2024 6:00	11,14	0,59	2,71	660
54	10/2/2024 3:00	10/3/2024 5:00	12,77	0,47	5,49	840
55	10/3/2024 17:00	10/5/2024 22:00	30,27	0,56	2,95	2820
56	10/8/2024 22:00	10/9/2024 11:00	16,76	1,20	4,13	480
57	10/10/2024 8:00	10/12/2024 1:00	16,44	0,39	2,46	1980
58	10/13/2024 6:00	10/13/2024 23:00	8,66	0,48	2,46	480

Ereignisplots

Für alle 53 erfassten Ereignisse wurden automatisiert Ereignisplots erstellt (jeweils zwei Plots je Ereignis mit unterschiedlichen Tabellen und Grafiken). Als Beispiel sind die zwei Ereignisplots des Ereignisses 40 angeführt, im Folgenden wird kurz erläutert, wie diese interpretiert werden können.

Abbildung 86 zeigt den ersten Teil des Ereignisplots des Ereignisses Nr. 40. In der oberen Tabelle sind in der Spalte „Wetter“ die Kennwerte zu den Niederschlagsereignissen angeführt, mit einer Niederschlagssumme von 45,15 mm an der Wetterstation groß und 27,76 mm an der Wetterstation klein. Die maximale N-Intensität beträgt 23.96 mm/h (Wetterstation groß) bzw. 11.52 mm/h (Wetterstation klein). Die Dauer exklusive Pausen beträgt für die Wetterstation groß 3.67 h und für die Wetterstation klein 2.90 h. Diese Zeitspanne stellt die Summe aller Intervalle innerhalb der Ereignisdauer da, in der auch ein Niederschlag registriert wurde. Der prozentuelle Regenanteil errechnet sich aus dem Verhältnis der Dauer exklusive Pausen zu der Ereignisdauer und beträgt für die Wetterstation groß 13.58 % bzw. für die Wetterstation klein 10.74 %. Die effektive mittlere Intensität gibt die mittlere Intensität des Niederschlagsereignisses bezogen auf die Dauer exklusive Pausen an. Diese beträgt für die Wetterstation groß 12.31 mm/h und für die Wetterstation klein 9.57 mm/h. Dies zeigt, dass diese Niederschlagszelle ihr Zentrum eher in der Nähe der Wetterstation groß

hatte und der Bereich um die Wetterstation klein weniger stark überregnet wurde. Der geringe Regenanteil zeigt zudem, dass der Niederschlag innerhalb einer kurzen Zeitperiode in mehreren Schauern gefallen ist. Ebenfalls in der Spalte „Wetter“ finden sich Angaben zur mittleren Luftfeuchte (ca. 96 %), mittleren Lufttemperatur (16°C) der beiden Wetterstationen und der mittleren Windstärke (0.52 m/s), welche an der Wetterstation groß gemessen wurde.

In der rechten Seite der Tabelle werden in der Spalte „Vorfeuchteindex“ die berechneten Werte der Vorfeuchteindizes 1, 2, 3 und 4 zu Ereignisbeginn und Ereignisende angeführt. Diese zeigen, dass zu Beginn des Ereignisses mit 4 bis 17 eine geringe Vorfeuchte herrschte. Im Zuge des Ereignisniederschlages stiegen die Werte auf 45 bis 61 an. Ebenfalls in der rechten Seite der Tabelle sind in der Spalte „Bodenfeuchte“ die in der Wetterstation klein gemessenen Bodenfeuchten in unterschiedlichen Tiefen (10, 20, 30 und 40 cm) zu Ereignisbeginn und Ereignisende angeführt. Diese zeigen erneut eine mittlere Vorfeuchte im Boden mit Bodenfeuchtigkeiten zwischen 40 und 54 % zu Ereignisbeginn. Im Zuge des Ereignisses stieg dabei vor allem die Bodenfeuchte in 10 cm Tiefe stark an (auf 71 %), die Bodenfeuchte in den unteren Bodenschichten nur auf ca. 62 %.

Das erste Diagramm zeigt auf der linken Y-Achse die gemessenen Niederschlagsintensitäten in mm/min der Wetterstation groß (blau) und Wetterstation klein (türkis). Auf der rechten Y-Achse sind die Werte der gemessenen Luftfeuchtigkeit der Wetterstation groß (rot) und Wetterstation klein (orange) aufgetragen.

Das zweite Diagramm zeigt auf der linken Y-Achse die gemessene Bodenfeuchtigkeit in 10 cm (schwarz-strichliert) bzw. 40 cm Tiefe (grau-strichliert). Auf der rechten Y-Achse sind die berechneten Werte der vier Vorfeuchteindizes dargestellt. Es zeigt sich, dass der Verlauf der Vorfeuchteindizes vor allem mit der Bodenfeuchte in 10 cm Tiefe stark korreliert.

Im dritten Diagramm ist auf der linken Y-Achse der am Pegel Rindbach gemessene Durchfluss in blau dargestellt. Darin sind für den Zeitraum vor dem Niederschlagsbeginn einige Messfehler zu erkennen. Auch der starke, leicht verzögerte Anstieg des Durchflusses durch den ersten Schauer ist in der Ganglinie gut zu erkennen. Die darauffolgenden Schauer mit geringeren Intensitäten rufen keinen wesentlichen Anstieg der Ganglinie hervor. Erst der letzte Schauer mit einer hohen Intensität führt zu einem erneuten Anstieg der Ganglinie. Ebenfalls im dritten Diagramm auf der rechten Y-Achse ist die Lufttemperatur der Wetterstation groß (rot) bzw. Wetterstation klein (orange) dargestellt. Diese liegt vor Beginn des Niederschlages bei ca. 27°C und nimmt während des ersten Schauers drastisch auf ca. 17°C

ab. Während der darauffolgenden Schauer mit geringeren Intensitäten steigt diese wieder leicht an und fällt mit dem letzten intensiven Schauer auf unter 15°C.

Das vierte Diagramm enthält die Ganglinien des Durchflusses der sechs beobachteten Teileinzugsgebiete (gemessene Abflusshöhen mithilfe des theoretischen Pegelschlüssels in einen Durchfluss umgerechnet). Mit den Ganglinien nach drei unterschiedlichen Berechnungsmethoden (Bezzola, Smart & Jäggi, VPE).

Den höchsten Spitzenabfluss liefert das Teileinzugsgebiet 2 (grün) im Zuge des ersten Schauers. Der Anstieg der Ganglinie erfolgt dabei jedoch stark verzögert. Das Teileinzugsgebiet 3 (rot), welches oberhalb des Teileinzugsgebiet 2 liegt, zeigt einen deutlich früheren Anstieg, dafür einen wesentlich geringeren Spitzenabfluss. Das Teileinzugsgebiet 4 (violett) zeigt einen Anstieg zeitgleich mit dem Teileinzugsgebiet 3. Die kleineren Teileinzugsgebiete 5 und 6 steigen ebenfalls zum selben Zeitpunkt an, jedoch deutlich flacher und mit einem weitaus geringeren Spitzenabfluss. Die darauffolgenden Schauer mit geringeren Intensitäten rufen über alle Teileinzugsgebiete hinweg keinen deutlichen Anstieg der Abflussganglinie hervor. Erst der letzte Schauer mit hoher Intensität zeigt wieder einen deutlichen Anstieg in den Ganglinien aller Teileinzugsgebiete. Das Teileinzugsgebiet 1 (blau) zeigt über das gesamte Ereignis hinweg keine Reaktion in der Abflussganglinie, trotz der eigentlich hohen Niederschlagssumme.

Die untere Tabelle enthält eine Auflistung der Abflussparameter für alle Teileinzugsgebiete und dem Pegel Rindbach. Es sind der Spitzenabfluss, die Abflussfracht, der mittlere Abfluss und der in der Abflussfracht nicht berücksichtigte Basisabfluss angegeben.

Abbildung 86 Ereignisplot Teil 1 des Ereignisses Nummer 40

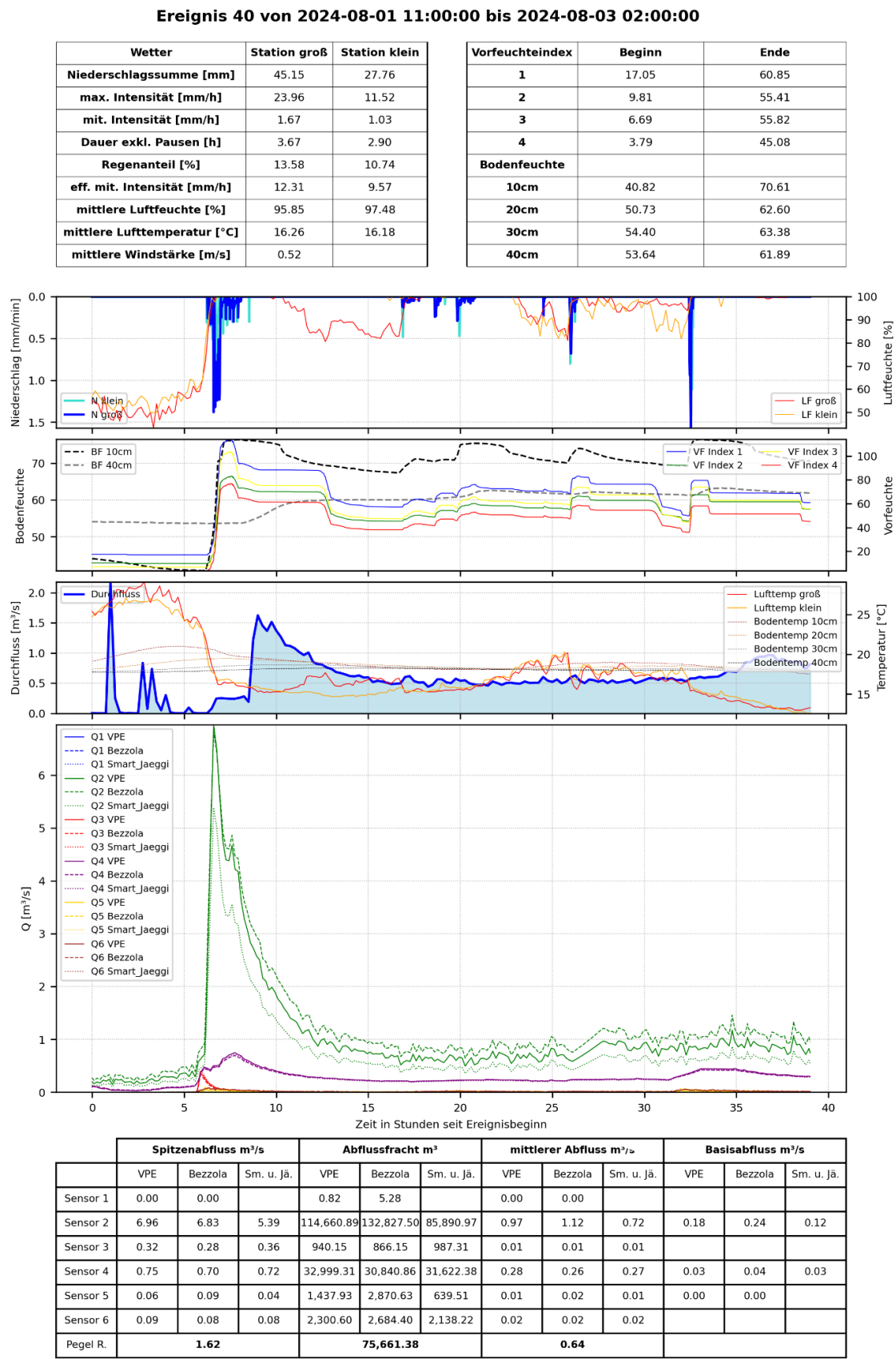


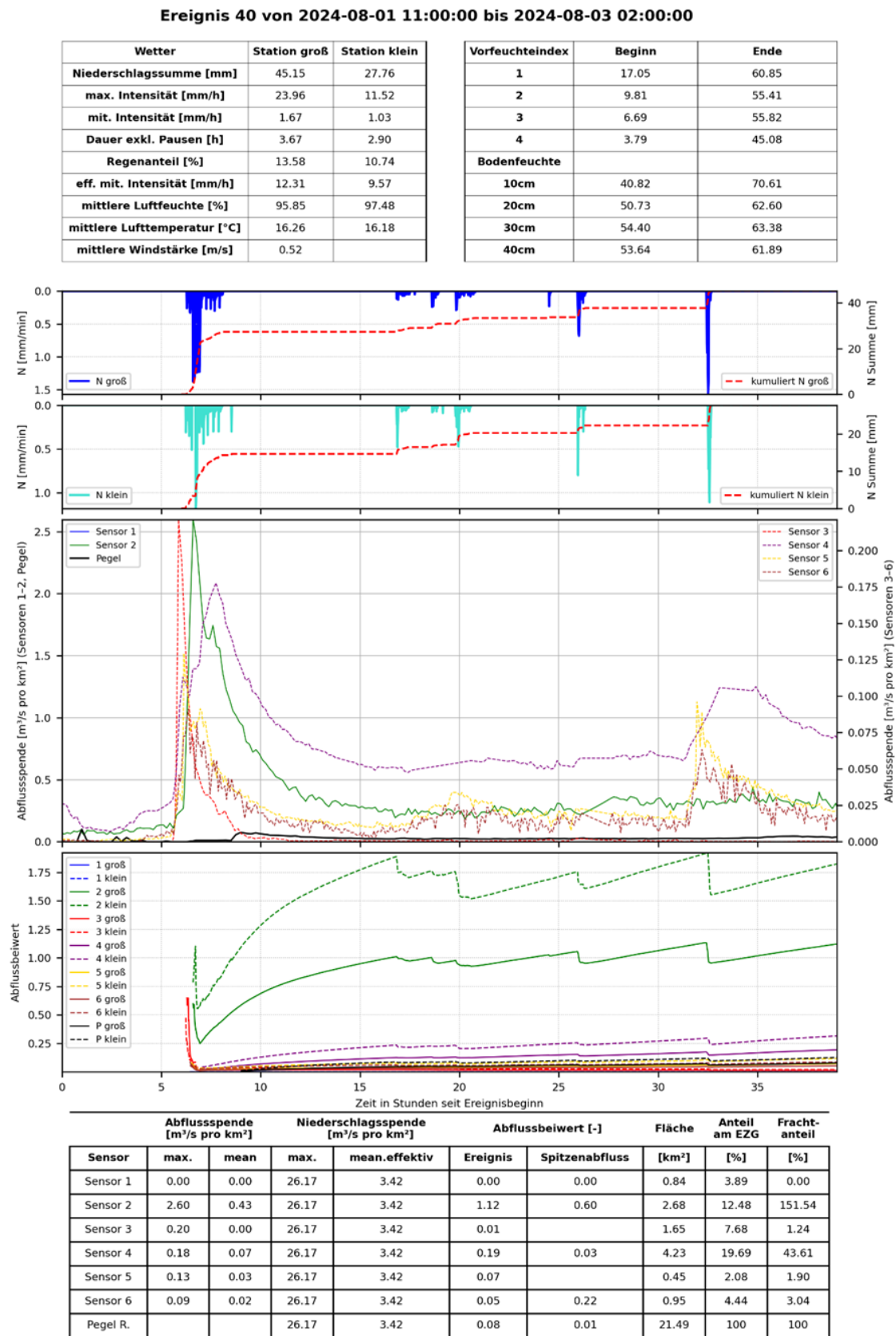
Abbildung 87 zeigt den zweiten Teil des Ereignisplots des Ereignisses Nr. 40. Die erste Tabelle stellt eine Wiederholung aus Teil 1 des Ereignisplots dar. Die ersten beiden Grafiken zeigen noch einmal die gemessenen Niederschlagsintensitäten auf der linken Y-Achse. Zusätzlich ist auf der rechten Y-Achse eine Niederschlagssummenlinie abgebildet, in der die über die Ereignisdauer hinweg kumulativ aufsummierte Niederschlag abzulesen ist. Die Grafik zeigt, dass der erste Schauer, welcher die deutlichste Reaktion in den Abflussganglinien hervorruft, mit ca. 30 mm zwei Drittel der gefallenen Gesamt-Niederschlagsmenge darstellt. Die darauffolgenden Schauer haben nur einen geringen Anteil an der gesamten Niederschlagsmenge. Erst der letzte Schauer hat mit einer Menge von ca. 10 mm wieder einen nennenswerten Anteil an der Gesamtniederschlagsmenge.

In der dritten Grafik wird die auf die Fläche normierte Abflussspende [m^3/s pro km^2] dargestellt. Dabei sind die Teileinzugsgebiete 1, 2 und der Pegel Rindbach auf der linken Y-Achse und die Teileinzugsgebiete 3, 4, 5 und 6 auf der rechten Y-Achse abgebildet. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Anstieg der Ganglinie im Teileinzugsgebiet 2 später als in den übrigen Teileinzugsgebieten erfolgt. Der Anstieg des Pegels Rindbach erfolgt noch später. Die Abflussspendenspitze wird im Teileinzugsgebiet 3 zuerst erreicht, gefolgt von den Teileinzugsgebieten 5 und 6. Darauf folgt das Teileinzugsgebiet 2 und erst wesentlich später das Teileinzugsgebiet 4. Der letzte Schauer zeigt nur mehr einen deutlichen Anstieg der Abflussspende in den hinteren Teileinzugsgebieten (4, 5 und 6). Zu erwähnen ist dabei, dass der Anstieg im Teileinzugsgebiet mit einem geringen Gefälle und ohne Sprünge erfolgt. Zusätzlich ist in der Ganglinie an der Spitze ein leicht abnehmendes Plateau zu sehen. Dies deutet auf einen hohen Anteil an Zwischenabfluss hin.

In der vierten Grafik ist der für alle Teileinzugsgebiete für jedes Zeitintervall aus dem Verhältnis von Abflussfracht zu Niederschlagsfracht ermittelte Abflussbeiwert dargestellt. Der Abflussbeiwert wird dabei erst 2 h nach Ereignisbeginn dargestellt. Als Niederschlagsfracht wird sowohl jene der Wetterstation groß (durchgezogene Linie) als auch jene der Wetterstation klein (strichlierte Linie) verwendet. Zu Beginn ist der Abflussbeiwert aufgrund des leicht erhöhten Basisabflusses und der geringen gefallenen Niederschlagsmenge sehr hoch, sinkt aber schnell auf den eigentlichen Wert ab. Im Zuge jedes Schauers sinkt der Abflussbeiwert wieder, da der gefallene Niederschlag erst den Pegel erreichen muss. Je schneller der Abflussbeiwert dabei wieder ansteigt, desto rascher erfolgt der Prozess der Abflussbildung. Generell ist der Abflussbeiwert des Teileinzugsgebietes 2 sehr hoch (Beitrag aus unterirdischem Abfluss aus dem Teileinzugsgebiet 3 kann fallweise zu Abflussbeiwerten über 1,0 führen). Die Abflussbeiwerte der übrigen Teileinzugsgebiete bewegen sich hingegen in plausiblen Bereichen.

In der unteren Tabelle sind noch Angaben zur maximalen und mittleren Abflussspende bzw. Niederschlagsfracht zu finden. Zudem ist auch der Ereignisabflussbeiwert und der Abflussbeiwert bei Erreichen des Spitzenabflusses angeführt. Die drei Spalten auf der rechten Seite zeigen für die Plausibilitätskontrolle die Fläche des Teileinzugsgebietes sowie den Flächenanteil des Teileinzugsgebietes am gesamten Einzugsgebiet in Prozent, sowie den errechneten Frachtanteil des Teileinzugsgebietes an der Gesamtfracht. Die Gesamtfracht stellt dabei die ermittelte Fracht am Pegel Rindbach dar.

Abbildung 87 Ereignisplot Teil 2 des Ereignisses Nummer 40



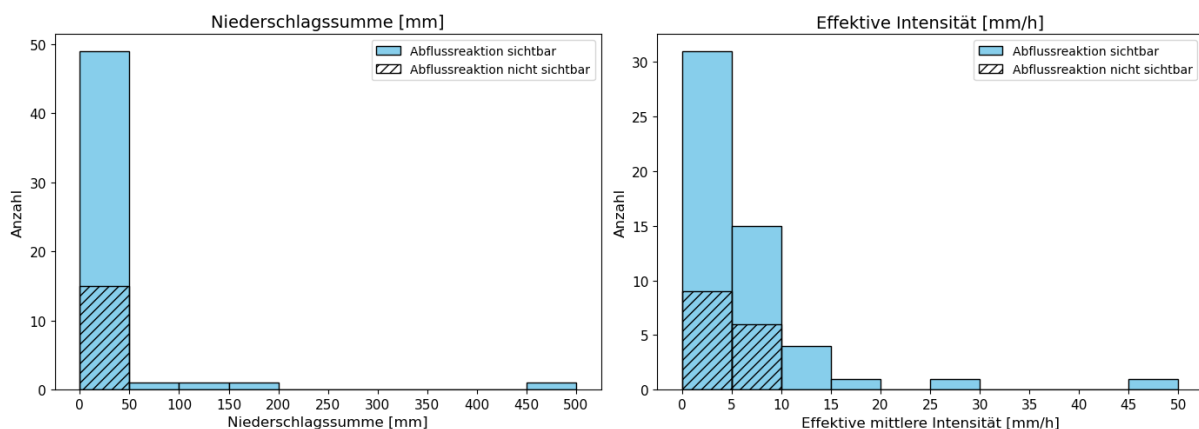
Ergebnisse der Ereignisanalysen

Im Folgenden sind nur einige Auswertungsergebnisse von Reaktionen einzelner Teileinzugsgebiete für bestimmte Parameter dargestellt. Eine vollständige Darstellung der Auswertungen gibt M. Aichinger (2025) in seiner Masterarbeit. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden nur mehr die Daten der Wetterstation groß verwendet, da diese näher an den Teileinzugsgebieten liegt. Zudem wurden nur die Durchflüsse, welche mit dem Variablen Potenzgesetz (VPE) nach Rickenmann & Recking (2011) berechnet wurden, verwendet.

Verteilung der Niederschlagssumme und der mittleren effektiven Intensität

Abbildung 88, linke Grafik, zeigt, dass sämtliche Ereignisse, in denen keine Abflussreaktionen in den Abflussganglinien sichtbar sind, eine Niederschlagssumme von unter 50 mm aufweisen. Nur bei 4 Ereignissen (Ereignis 50, 4, 9 und 16) ist die N-Summe > 50 mm, bei Ereignis Nr. 50 mit einer sehr hohen Niederschlagssumme von 460 mm. Berechnungen der effektiven mittleren Intensität (N-Summe / effektive Ereignisdauer) zeigen, dass vor allem bei geringen Intensitäten keine Abflussreaktion zu erkennen ist (rechtes Histogramm). Es wurden auch zwei Ereignisse mit einer hohen Intensität von 49 mm/h (Ereignis 25) bzw. 27 mm/h (Ereignis 44) aufgezeichnet.

Abbildung 88 Histogramm der Niederschlagssumme und der effektiven Intensität der identifizierten Ereignisse



Generell wurden nur wenige Ereignisse mit einer längeren Ereignisdauer beobachtet. 15 Ereignisse, in denen keine Abflussreaktion sichtbar ist, weisen alle eine kurze Ereignisdauer von unter 10 h auf (Abbildung 89). Ereignis 50 mit einer Niederschlagssumme von 460 mm

vom September 2024 (große Hochwasserereignisse in Ostösterreich) stellt mit einer effektiven Ereignisdauer von 102 h das längste Ereignis dar, gefolgt vom Ereignis 4 (38 h), Ereignis 9 (28 h), Ereignissen 55 und 16 (jeweils 16 h).

Abbildung 89 Histogramm der effektiven Ereignisdauer der identifizierten Ereignisse

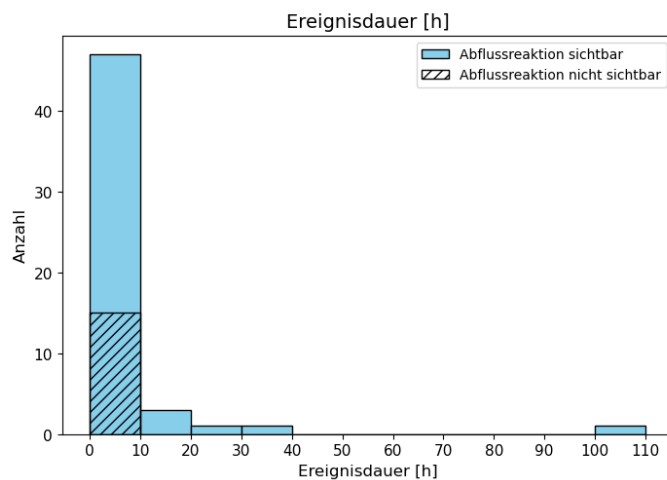
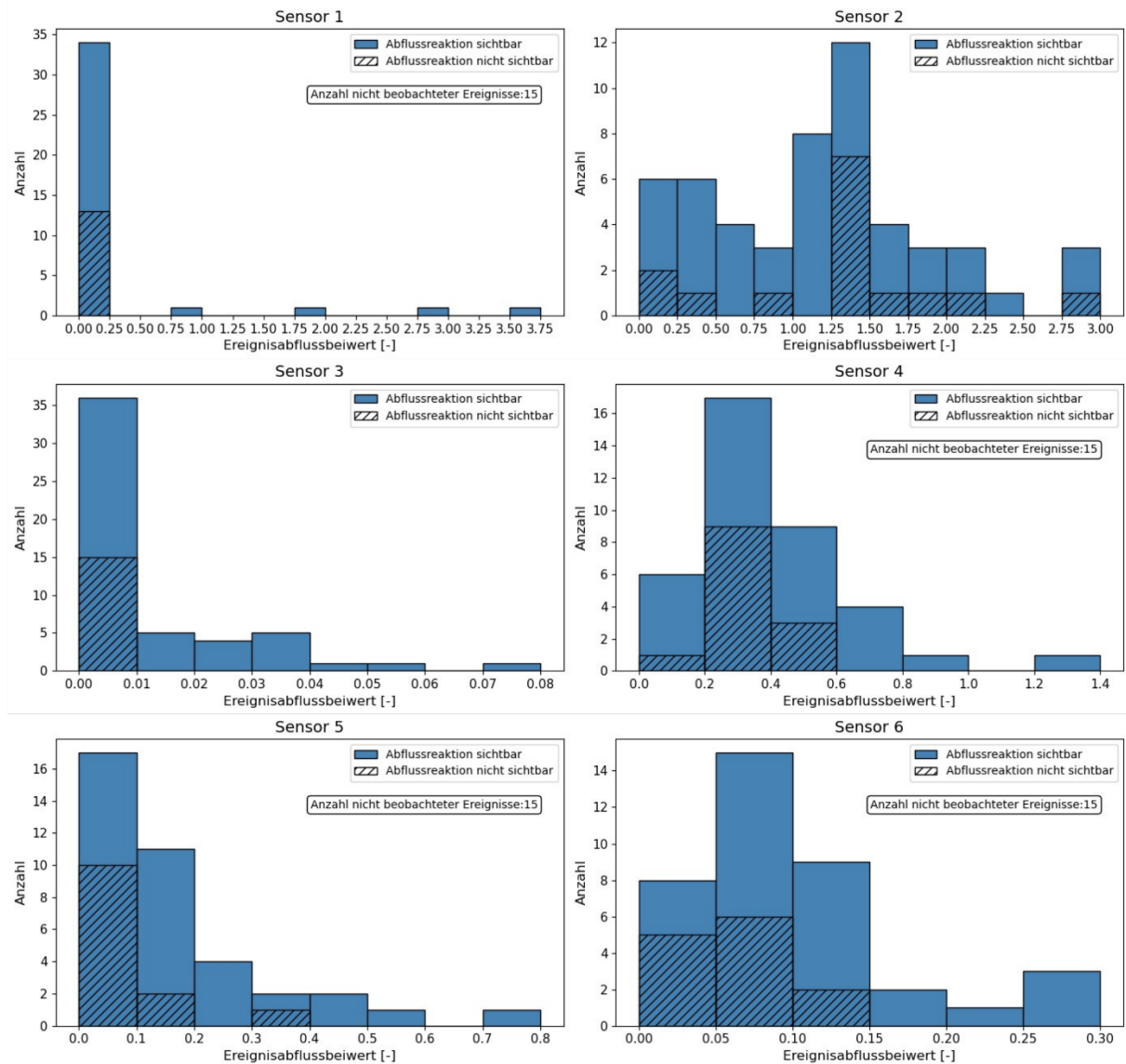


Abbildung 90 zeigt die Ereignisabflussbeiwerte (E_ψ) für die sechs beobachteten Teileinzugsgebiete. Im Teileinzugsgebiet (TEZG) 1 weisen 33 Ereignisse ein E_ψ von unter 0.01 auf. Auffallend sind drei Ereignisse mit E_ψ über 1 (Nr. 21 mit einem E_ψ von 3.6, Nr. 32 mit 2.8 und Nr. 25 mit 2.0).

Abbildung 90 Histogramme der Ereignisabflussbeiwerte der Teileinzugsgebiete 1-6
(Sensoren 1-6)



Auch das TEZG 2 weist zum Teil E_{ψ} über 1 auf. Sieben Ereignisse haben ein E_{ψ} von über 2, und sieben Ereignisse einen E_{ψ} zwischen 2 und 1.5. Im Bereich von <1.5 und >1.0 wurden 20 Ereignisse registriert. Bei den restlichen 19 Ereignisse ist der Ereignisabflussbeiwert <1.0 . Auffallend ist hier, dass auch Ereignisse, in denen bei einem Großteil der Sensoren keine Abflussreaktion feststellbar war, einen Ereignisabflussbeiwert von über 1 aufweisen. Dies ist eventuell auf einem hohen Basisabfluss bei gleichzeitiger geringer Niederschlagsmenge zurückzuführen.

TEZG 3, der obere Bereich des TEZG 2, liefert – wie in der linken mittleren Grafik in Abbildung 90 ersichtlich – nur sehr geringe Ereignisabflussbeiwerte. Bei 3 Ereignissen wurde aus

dem TEZG 3 kein Abfluss gemessen. Alle 15 Ereignisse, welche als „keine Abflussreaktion sichtbar“ eingestuft wurden, weisen einen Ereignisabflussbeiwert von <0.01 auf. Das höchste E_{ψ} mit 0.08 wurde beim Ereignis 4 erreicht.

Das TEZG 4, ist das flächenmäßig größte TEZG. Die Ereignisabflussbeiwerte liegen zum Großteil in einem plausiblen Bereich, wobei das Ereignis 33 mit einem E_{ψ} von 1.3 einen Ausreißer nach oben darstellt. Zu erwähnen ist hier, dass einige Ereignisse, in denen bei einem Großteil der Sensoren keine Abflussreaktion sichtbar war, trotzdem einen Ereignisabflussbeiwert von 0.2 bis 0.6 aufweisen. Dies könnte ebenfalls auf den leicht erhöhten Basisabfluss durch das Ereignis zurückzuführen sein. Zudem fallen hier auch wieder 15 Ereignisse auf das Jahr 2023, für das keine Abflusshöhenmessungen vorliegen.

Während im TEZG 6 nur geringe Ereignisabflussbeiwerte mit bis zu 0.3 ermittelt wurden, reichen die Ereignisabflussbeiwerte im TEZG 5, welche das TEZG 6 beinhaltet, bis zu 0.8. Das Ereignis 22 mit einem E_{ψ} von 0.26 (TEZG 6) bzw. 0.72 (TEZG 5) stellt das Ereignis mit dem höchsten E_{ψ} dar.

Spitzenabflüsse in den einzelnen Teileinzugsgebieten (TEZG)

Das TEZG 1 in Abbildung 91 zeigt großteils nur geringe Spitzendurchflüsse. Konkret weisen 34 Ereignisse einen Spitzenabfluss von unter $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$ auf, wobei 32 Ereignisse davon einen Spitzenabfluss von $0.006 \text{ m}^3/\text{s}$ nicht überschreiten, also nahezu keine Abflussreaktion zeigen. Auffallend sind die vier Ereignisse (Ereignisnummer 25, 21, 50 und 32) mit einem Spitzenabfluss von über $10 \text{ m}^3/\text{s}$.

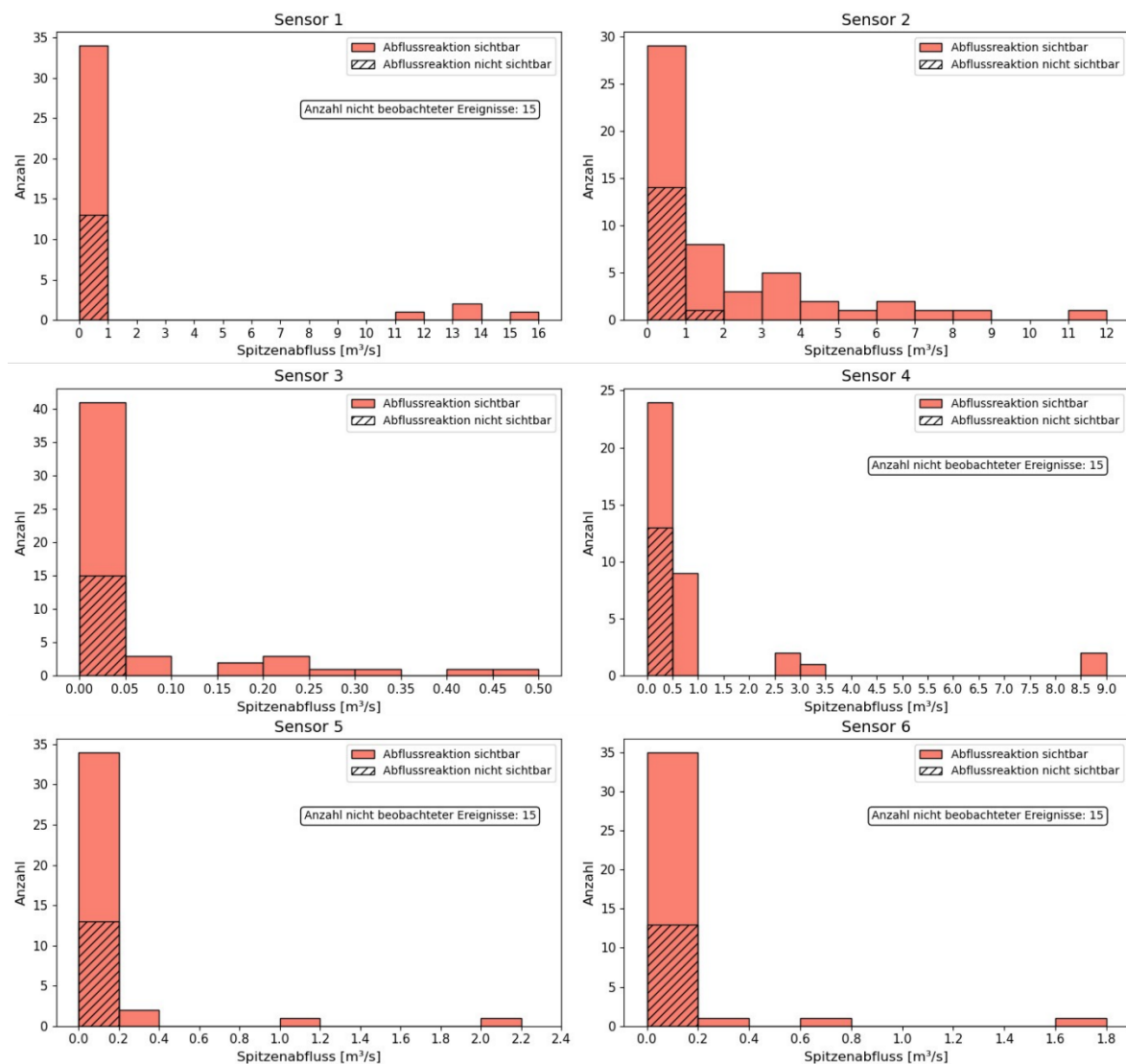
TEZG 2 zeigt eine regelmäßigere Verteilung der Spitzenabflüsse, welche mit der Verteilung der Niederschlagssummen übereinstimmt. Die 15 Ereignisse, in denen keine Abflussreaktion sichtbar war, weisen alle einen geringen Spitzenabfluss von unter $2 \text{ m}^3/\text{s}$ auf. Der höchste Spitzenabfluss mit $11.5 \text{ m}^3/\text{s}$ wurde beim langen Ereignis 50 erreicht.

Die Spitzenabflüsse im TEZG 3 reichen bis zu $0.48 \text{ m}^3/\text{s}$ (Ereignis 32). Im TEZG 4 weisen 33 Ereignisse einen Spitzenabfluss von unter $1 \text{ m}^3/\text{s}$ auf. Der mit $8.96 \text{ m}^3/\text{s}$ höchste Spitzenabfluss wurde im langen Ereignis 50 erreicht.

In TEZG 6 wird ein Spitzenabfluss von $0.4 \text{ m}^3/\text{s}$ von 36 Ereignissen unterschritten und nur von zwei Ereignissen überschritten. Dasselbe gilt für TEZG 5. Der höchste Spitzenabfluss wird wieder im Ereignis 50 erzielt, wobei dieser im TEZG 6 $1.62 \text{ m}^3/\text{s}$ und im TEZG 5

2.18 m³/s beträgt. Der Spitzendurchfluss nahm also in dem Bereich um 0.56 m³/s zu. Der zweitgrößte Spitzenabfluss wurde innerhalb des Ereignisses 25 mit einem Wert von 1.14 m³/s (TEZG 6) bzw. 0.72 m³/s (TEZG 5) erreicht. Die Zunahme beträgt hier 0.42 m³/s.

Abbildung 91 Histogramm des Spitzenabflusses der Teileinzugsgebiete 1-6 (Sensoren 1-6)



In der Tabelle 20 sind die drei größten Spitzenabflüsse und deren Ereignisnummer, bei denen diese erreicht wurde, für die beobachteten sechs TEZG dargestellt. Dabei ist anzumerken, dass die Ereignisse mit den Nummern 1 bis 19 im Jahr 2023 beobachtet wurden und daher für die Sensoren 1, 4, 5 und 6 keine Abflusshöhenmessungen vorliegen. Die Zunahme des Spitzenabflusses im Ereignis 32 zwischen Sensor 3 und 2 beträgt 8.04 m³/s und im Ereignis 4 6.64 m³/s.

Tabelle 20 Übersicht über die drei größten Spitzenabflüsse je Teileinzugsgebiet

ID	Größter Spitzenabfluss	Zweitgrößter Spitzenabfluss	Drittgrößter Spitzenabfluss
1	15,78 m ³ /s, Ereignis 25	13,67 m ³ /s, Ereignis 21	13,26 m ³ /s, Ereignis 50
2	11,48 m ³ /s, Ereignis 50	8,52 m ³ /s, Ereignis 32	7,09 m ³ /s, Ereignis 4
3	0,48 m ³ /s, Ereignis 32	0,45 m ³ /s, Ereignis 4	0,32 m ³ /s, Ereignis 40
4	8,96 m ³ /s, Ereignis 50	3,25 m ³ /s, Ereignis 21	2,83 m ³ /s, Ereignis 25
5	2,18 m ³ /s, Ereignis 50	1,14 m ³ /s, Ereignis 25	0,27 m ³ /s, Ereignis 32
6	1,62 m ³ /s, Ereignis 50	0,72 m ³ /s, Ereignis 25	0,36 m ³ /s, Ereignis 32

Effektive mittlere Intensität und Ereignisdauer

Abbildung 92 zeigt den Zusammenhang zwischen den Spitzenabflusswerten des Pegels an der Nicolaibrücke am Rindbach und der mittleren effektiven Intensität. Der höchste Spitzenabfluss mit 23.4 m³/s wurde beim längsten Ereignis (Nr. 50) mit einer effektiven Dauer von 102 h erreicht. Hohe Spitzenabflüsse können bei einer langen Ereignisdauer und mittleren effektiven Intensitäten, aber auch bei Ereignissen kurzer Dauer, z.B. von 86 Minuten (Ereignis 32) bzw. 45 Minuten (Ereignis 25) bei gleichzeitig hohen mittleren effektiven Intensitäten von 19 mm/h (Ereignis 32) bzw. 49 mm/h (Ereignis 25) erreicht werden. Für die bessere Lesbarkeit der Abbildung wurde eine log-log Darstellung gewählt.

Abbildung 92 Effektive mittlere Intensität und Ereignisdauer (log-log Darstellung) mit farblich klassifizierten Spitzenabflusswerten des Pegel Rindbachs. Die größten 15 Werte sind gekennzeichnet.

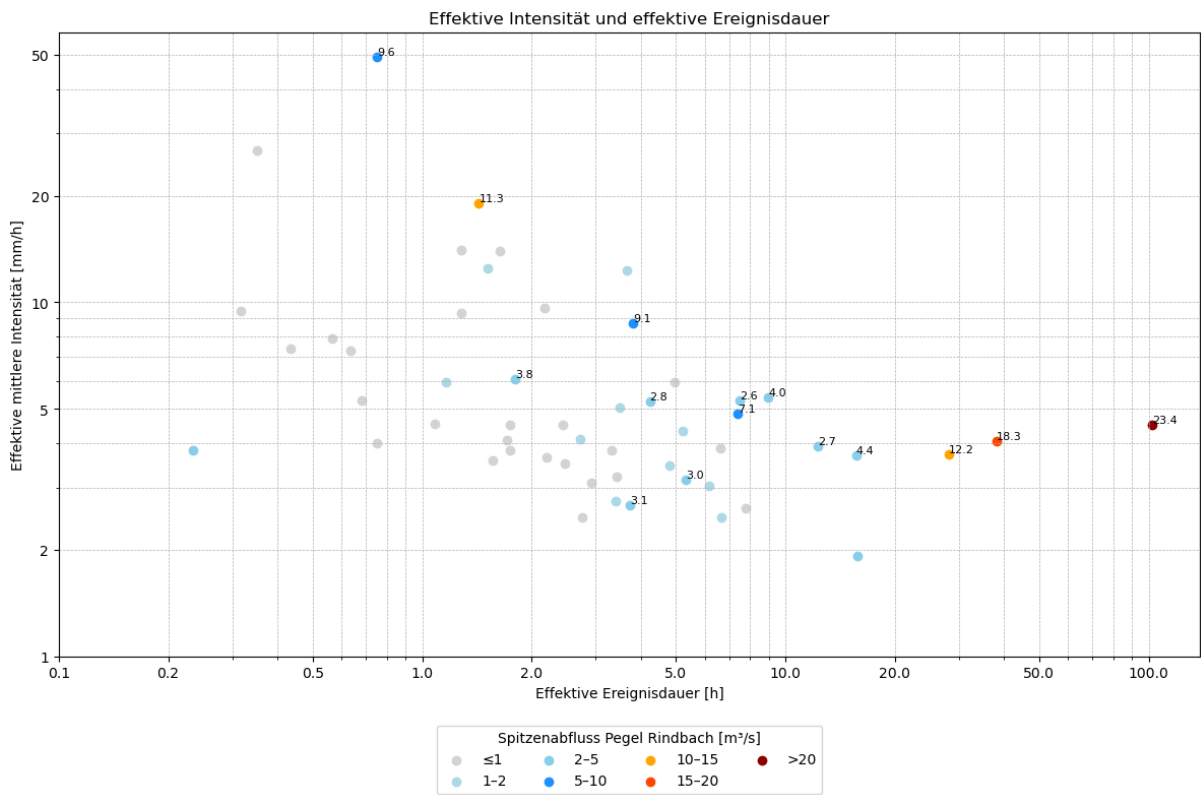


Tabelle 21 enthält die Charakteristika der fünf Ereignisse mit dem größten Spitzenabfluss am Pegel Rindbach. Die Ereignisse 50, 4 und 9 weisen dabei eine besonders lange Niederschlagsdauer auf, während die Ereignisse 9 und 32 eine hohe mittlere Intensität zeigen.

Tabelle 21 Niederschlagscharakteristiken der fünf Ereignisse mit dem größten Spitzenabfluss am Pegel Rindbach

Ereignis ID	Niederschlagssumme [mm]	Effektive Ereignisdauer [h]	Effektive mittlere Intensität [mm/h]
50	459,63	102,12	4,50
4	154,60	38,08	4,06
9	105,05	28,18	3,73
32	27,36	1,43	19,09
25	37,01	0,75	49,35

Tabelle 22 zeigt die zugehörigen Spitzenabflusswerte der fünf Ereignisse mit dem größten Spitzenabfluss am Pegel Rindbach und den sechs TEZG. Für die TEZG 1, 4, 5 und 6 liegen Abflusshöhenmessungen erst mit dem Jahr 2024 vor. Die Summe der Spitzenabflüsse der beobachteten TEZG übersteigt jene des Pegels Rindbach zum Teil deutlich (z.B. Ereignis 25 in TEZG 1), obwohl nur 40.5 % der Fläche des Einzugsgebietes beobachtet wird. Auffallend sind die sehr hohen Spitzenabflüsse im TEZG 1 und 2. Beim Ereignis 32 wurde im oberen Teil des TEZG 6 (an Sensor 5) ein Spitzenabfluss von 0.36 m³/s ermittelt, während der Spitzenabfluss im unteren Teil des Teileinzugsgebietes (Sensor 6) der Spitzenabfluss nur mehr bei 0.27 m³/s liegt. Zudem sind die Spitzenabflüsse im oberen Teil des TEZG 2 (Sensor 3) mit ca. 0.2 bis 0.5 m³/s sehr gering, während die Spitzenabflüsse im unteren Teil des TEZG (Sensor 2) mit ca. 5 bis 11 m³/s sehr hoch ausfallen.

Tabelle 22 Spitzenabflusswerte der fünf Ereignisse mit dem größten Spitzenabfluss am Pegel Rindbach und den zugehörigen Spitzenabflusswerten der Teileinzugsgebiete

Ereignis ID	Spitzenabfluss [m³/s]						
	Pegel Rindbach	TEZG 1	TEZG 2	TEZG 3	TEZG 4	TEZG 5	TEZG 6
50	23,41	13,26	11,48	0,27	8,96	2,18	1,62
4	18,30	-	7,09	0,45	-	-	-
9	12,20	-	4,67	0,24	-	-	-
32	11,29	11,12	8,52	0,48	2,83	0,27	0,36
25	9,62	1587	5,35	0,19	2,83	1,14	0,72

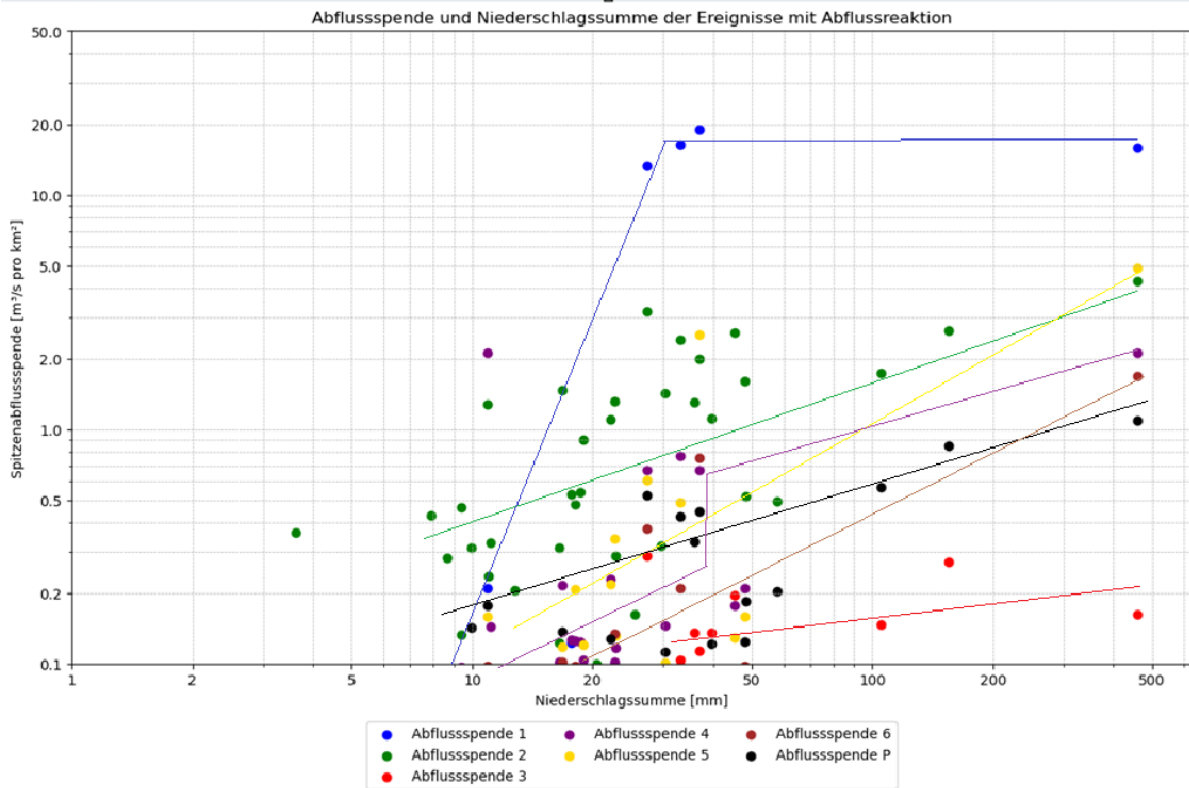
Spitzenabflussspende und Niederschlagssumme

Die Höhe des Spitzenabflusses [m³/s] in Relation zur gefallen N-Menge ist aus Abbildung 93 ersichtlich. Dabei wurde der Spitzenabfluss [m³/s] auf die Fläche der Teileinzugsgebiete normiert und so die Spitzenabflussspende [m³/s pro km²] berechnet, damit die TEZG untereinander vergleichbar sind. Die Darstellung erfolgt aus Gründen der Lesbarkeit in einer log-log Skalierung der Achsen. In den Daten sind nur jene Ereignisse enthalten, welche eine Abflussreaktion zeigen (Datensatz „Q sichtbar“). Aufgrund der ungleichmäßigen Verteilung

der Daten konnte keine sinnvolle Regression berechnet werden. Daher wurde der Trend zur Visualisierung händisch gezeichnet.

TEZG 1 zeigt bei geringen Niederschlagsmengen unter 10 mm keine Reaktion. Ab einer Niederschlagsmenge von ca. 25 bis 35 mm kommt es zu einem sprunghaften Anstieg der Spitzenabflusspende und diese erreicht 15 bis 20 m³/s pro km². Die zweitgrößten Spitzenabflusspenden liefert das Teileinzugsgebiet 2, wobei diese mit steigender Niederschlagsmenge ebenfalls zunehmen. Auch bei geringeren Niederschlagssummen liefert dieses TEZG verhältnismäßig hohe Spitzenabflusspenden. Das TEZG 5 zeigt bei hohen Niederschlagsmengen ähnliche Spitzenabflusspenden wie das TEZG 2, jedoch liegen die Werte bei geringeren Niederschlagsmengen (unter 30 mm) deutlich unter jenen des TEZG 2. Das TEZG 6, welches das TEZG 5 ebenfalls beinhaltet, zeigt eine ähnliche Steigerung der Spitzenabflusspende mit der Niederschlagssumme, wobei die Werte etwas unter jenen des TEZG 5 (oberer Teil von TEZG 6) liegen. Das TEZG 4, welches flächenmäßig das größte TEZG darstellt, zeigt bei geringen Niederschlagsmengen eine geringe Spitzenabflusspende. Bei einer Niederschlagssumme von ca. 30 bis 40 mm erfolgt ein sprunghafter Anstieg der Spitzenabflusspende von 0.2 m³/s pro km² auf 0.75 m³/s pro km². Das TEZG 3, im oberen Teil des TEZG 2, zeigt nur sehr geringe Spitzenabflusspenden.

Abbildung 93 Spitzenabflussspende [$\text{m}^3/\text{s pro km}^2$] und Niederschlagssumme [mm] für alle Teileinzugsgebiete (1–6) und den Pegel Rindbach (P)



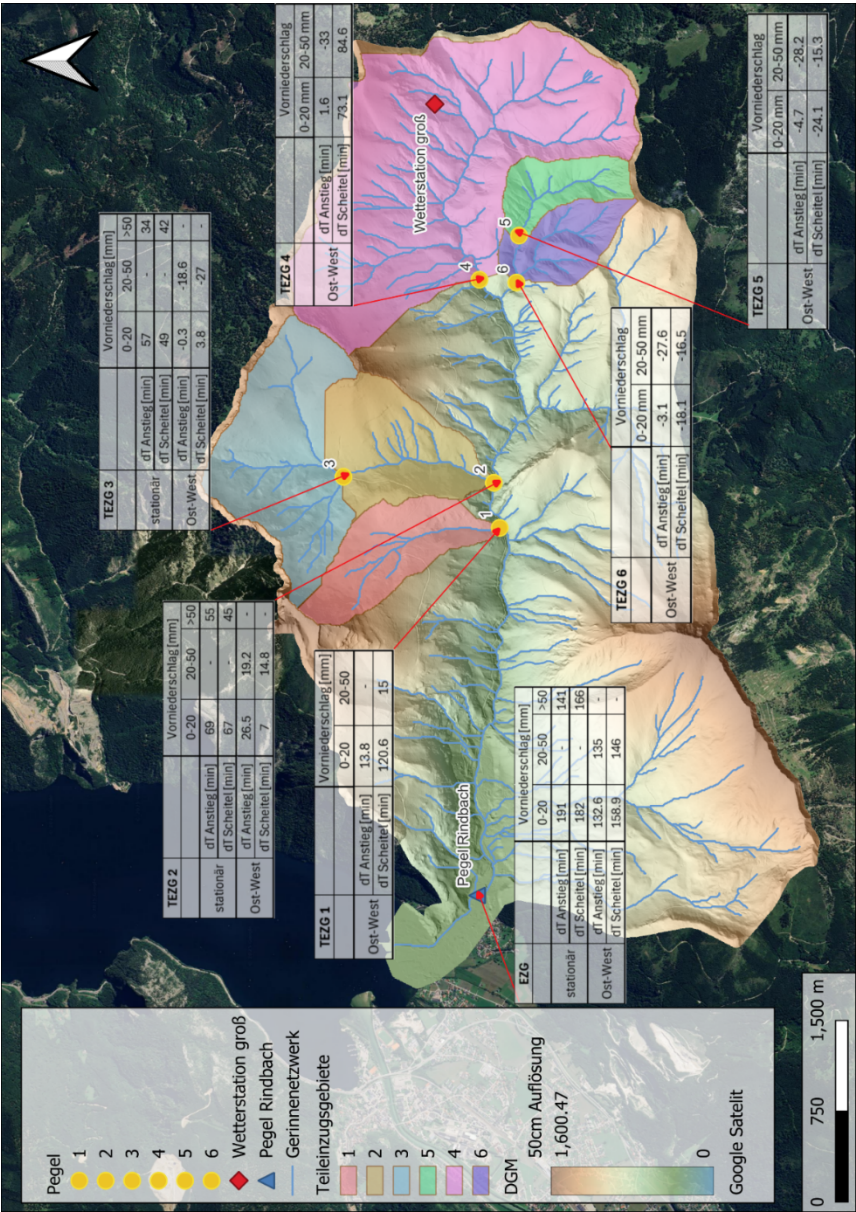
Verzögerung der Abflussbildung

Eine wichtige hydrologische Kenngröße ist die Zeitdifferenz zwischen dem Niederschlagsmaximum bzw. stärksten Anstieg der Niederschlagssummenkurve und dem Auftreten des Scheitelabflusses – in Abhängigkeit von der Vorniederschlagsmenge der Niederschlagsereignissen – im Rindbach mit einer ausgeprägten Zugrichtung der Niederschlagszelle von Osten nach Westen (Abbildung 94). Bei einer Vorniederschlagsmenge zwischen 0 und 20 mm wurde für den Sensor 5 mit -24.1 Minuten wieder die geringste Zeitdifferenz berechnet, gefolgt vom Sensor 6 mit -18.1 Minuten. Sensor 4 hat eine durchschnittliche Zeitdifferenz von 73.1 Minuten, was unter anderem auf die größere Teileinzugsgebietsfläche zurückzuführen ist. Im vorderen Bereich des Einzugsgebietes wurde für den Sensor 3 eine Zeitdifferenz von 3.8 Minuten berechnet. Die mittlere Zeitdifferenz für den Sensor 2 beträgt 7.0 Minuten und für den Sensor 1 dagegen 120.6 Minuten. Für das gesamte Einzugsgebiet wurde eine mittlere Zeitdifferenz von 158.9 Minuten berechnet.

Bei einer Vorniederschlagsmenge zwischen 20 und 50 mm sinkt die mittlere Zeitdifferenz auf 146.0 Minuten, ein Rückgang von 12.9 Minuten. Die Zeitdifferenz des Sensors 5 steigt

von 24.1 auf -15.3 Minuten, jene des Sensors 6 von -18.1 auf -16.5 Minuten und die des Sensors 4 von 73.1 auf 84.6 Minuten. Auch die Zeitdifferenz des Sensor 2 steigt von 7.0 auf 14.8 Minuten. Ein Rückgang der Zeitdifferenz ist hingegen bei Sensor 1 (von 120.6 auf 15.0 Minuten) und Sensor 3 (von 3.8 auf -27.0 Minuten) zu beobachten.

Abbildung 94 Auswertung der Zeitdifferenz zwischen Niederschlagsbeginn und Anspringen des Pegels bzw. Niederschlagsmaximum und Abflussspitze für die sechs beobachteten Teileinzugsgebiete, Zeitdifferenz als Mittelwerte für Vorniederschlagsklassen 0 bis 20 mm, 20 bis 50 mm und über 50 mm

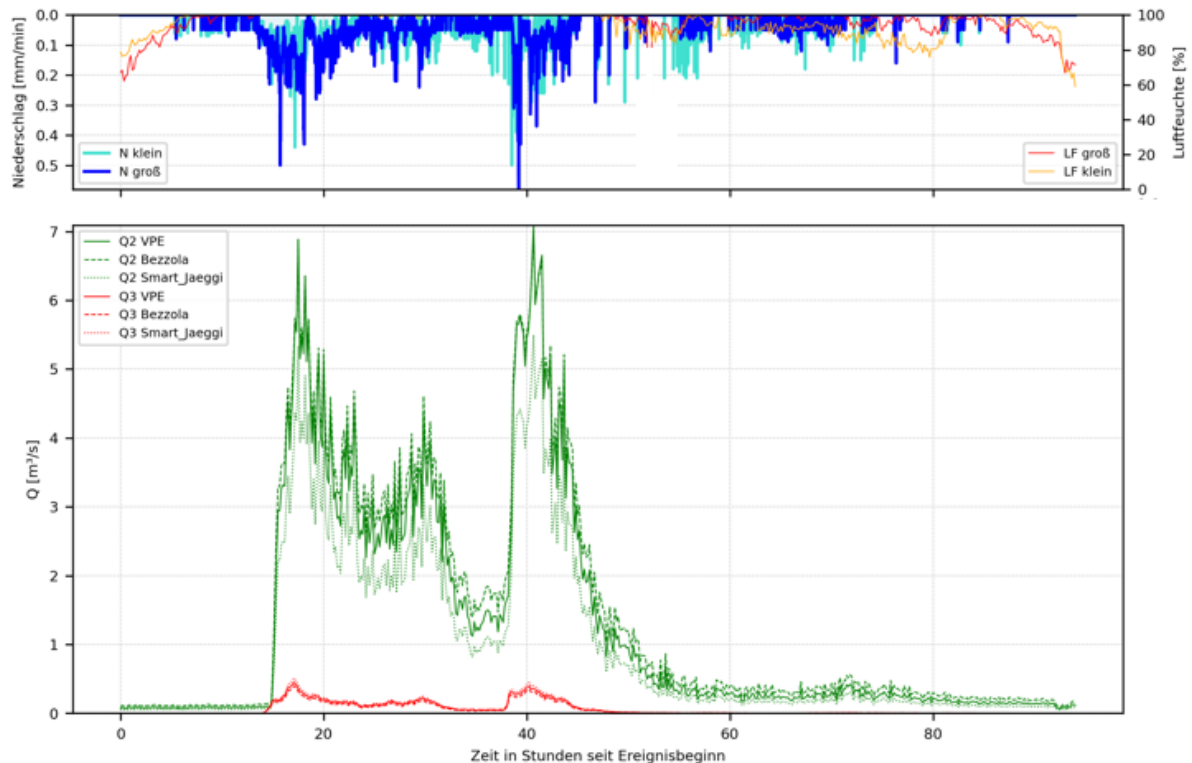


Form der Ganglinie

Die Form der Ganglinie zeigt, neben der Geschwindigkeit des Anstieges, auch wie die Abflussbildung erfolgt. Ein schneller Anstieg mit starken Schwankungen deutet auf den Einfluss von Karstquellschüttungen hin. Zudem deutet die Ausbildung von nur einer markanten Spitze auf einen hohen Anteil an Oberflächenabfluss bzw. oberflächennahem Abfluss hin. Bei Ausbildung eines flachen Abflussscheitels kann dies auf die Abflusstransformation im Gerinne, aber auch auf einen hohen Zwischenabflussanteil zurückzuführen sein. Wenn sich neben dem Hauptscheitel eine zweite Abflussspitze bildet, ist dies ein Hinweis auf einen sehr hohen Anteil an Zwischenabfluss mit längeren Fließzeiten.

Die Analyse der Form der Ganglinie erfolgte anhand der Ereignisplots. Nachfolgend werden typische Ganglinienformen der einzelnen Teileinzugsgebiet dargestellt und erläutert. Als Beispiel für die unterschiedliche Reaktion der sechs TEZG zeigt Abbildung 95 die typische Form der Abflussganglinie für die TEZG 2 und 3. Das TEZG 3, welches den oberen Teil des Teileinzugsgebietes 2 darstellt, liefert nur einen sehr geringen Durchfluss, obwohl es 62 % der Fläche des Teileinzugsgebietes 2 ausmacht. Die Ganglinie des TEZG 2 springt hingegen sehr schnell an und zeigt nach dem Spitzenabfluss meist deutliche Schwankungen des Durchflusses.

Abbildung 95 Typische Ganglinienform für die Teileinzugsgebiete 2 und 3



Diskussion

Berechnungen, Abflussbeiwertkarte

Die Berechnungsversuche auf den drei Testflächen ergaben vernachlässigbaren Oberflächenabfluss (OA) auf BF2 und BF6 (Abflussbeiwertklasse 0 bzw. 1) bzw. geringen OA (Abflussbeiwertklasse 3). Diese Ergebnisse passen gut in den Kontext zu Ergebnissen anderer Starkregensimulationen auf Karbonat-Hangschutt, z.B. am Kapall bei St. Anton oder auf der Ehrwalder Alm im Außerfern (beide Tirol) (Lechner et al., 2025). Bei der Anwendung der Geländeanleitung von Markart et al. (2004) für den Dorfbach im Kalkalpin der Schweiz kamen Hemund et al. (2010) zu ähnlichen Ergebnissen: AKL 0–3 für große Teile des Einzugsgebietes, AKL 5 für Fels-durchsetzte Flächen mit sehr geringmächtiger Bodenauflage. Die Abflussbeiwertkarte wird im Zuge der Maserarbeit S. Wieshammer noch weiterbearbeitet.

Die Berechnungen zeigen weiters, dass bei hohen N-Mengen in vielen Bereichen des Rindbach-Einzugsgebietes mit Auftreten von oberflächennahem Zwischenabfluss zu rechnen ist. Dieser entsteht insbes. Bei kurzzeitigen Starkregen zeitverzögert und kann aufgrund des

Reliefs im EZG (steile Hänge mit vielen Gefällsbrüchen) oft bereits nach kurzer Strecke als Returnflow an die Oberfläche treten und als linearer Abfluss in Tiefenlinien zur Erhöhung des Ereignisabflusses beitragen. Der ZA kann rasch auf Werte $> 10\%$ des Ereignisniederschlages ansteigen. Markart et al. (2013 – Projekt Shallow Interflow der ÖAW) ermittelten für Karbonat-Hangschutt im Wechsel mit Moränenlagen Fließgeschwindigkeiten des ZA bis 25 m/h. Insbesondere bei geringmächtiger Schuttauflage und präformierten Fließwegen an der Grenzschicht Hangschutt/unterliegender Fels können auch deutlich höhere Fließgeschwindigkeiten erreicht werden. Daher kann z.B. bei dauerregenartigen N-Ereignissen höherer Intensität Zwischenabfluss aus den seitlichen Einhängen mehrere hundert Meter hinauf Ereignis relevanten Abfluss für den jeweiligen Vorfluter liefern.

Fließhöhenmessungen – limitierende Faktoren

Die für die Erfassung der dieser Arbeit zugrundeliegenden Messungen von Abflusshöhen angewandte kosteneffiziente Methode weist einige limitierende Faktoren auf, die die Genauigkeit und die Beurteilung der erzielten Ergebnisse beeinflussen:

Die Abflusshöhenmessung in den Teileinzugsgebiete erfolgt ohne periodische Beobachtung von Querschnittsveränderungen und ohne Stabilisierung der Sohle bzw. Errichtung von stabilisierenden Maßnahmen wie zum Beispiel Sohlschwellen. In den Teileinzugsgebieten 1, 3, 5 und 6 konnte eine fixe Gerinnesohle verwendet werden. Daher ist eine Abweichung der Installationshöhe auszuschließen und die Werte der Abflusshöhenmessung können als qualitativ hochwertiger betrachtet werden. Die Abflusshöhenmessung der Teileinzugsgebiete 2 und 4 fand auf einer veränderlichen Gerinnesohle statt. Bei deren Werte ist daher eine Veränderung der Installationshöhe nicht auszuschließen und die Ergebnisse sind daher nicht so gut abgesichert wie jene der TEZG 1, 3, 5 und 6.

Zusätzliche Unsicherheiten resultieren aus möglichen Messfehlern der eingesetzten Sensoren. Offensichtliche Fehler konnten durch Algorithmen identifiziert und eliminiert werden. Besonders herausfordernd gestaltete sich die Auswertung der Daten aus Teileinzugsgebiet 1, da aufgrund der Charakteristik des Gebiets häufig starke Schwankungen im Durchfluss auftreten. Diese Schwankungen bedeuten erhebliche Schwierigkeiten für die Entwicklung von Algorithmen zur Fehlererkennung. Eine visuelle Überwachung mittels Kamera könnte diese Unsicherheit teilweise verringern. Generell ist jedoch festzuhalten, dass die Sensormessfehler nur einen geringen Einfluss auf das Gesamtergebnis haben. Ergänzend sei darauf hingewiesen, dass auch teure und aufwendiger zu installierende (Radar-)Pegel immer wieder offensichtliche und versteckte Fehler produzieren.

Eine große Unsicherheit ergibt sich auch durch den theoretischen Pegelschlüssel, der auf Abflussformeln basiert. Diese benötigen zur Bestimmung des Fließwiderstandes meist einen bestimmten Korndurchmesser und die Definition des Korndurchmessers ist über die unterschiedlichen Abflussformeln nicht einheitlich. Eine Eichung des theoretischen Pegelschlüssels mit Kontroll-Durchflussmessungen zu unterschiedlichen Abflusshöhen konnte aus logistischen (es wäre nahezu unmöglich und an einigen Standorten auch gefährlich bei N-Ereignissen höherer Intensität vor Ort zu sein), sowie Kosten-Gründen nicht durchgeführt werden. Daher kann die Plausibilität der errechneten Durchflussmengen nur anhand des Pegels am unteren Ende des Rindbaches überprüft werden, wobei auch dieser mit Unsicherheiten behaftet ist (instabile Sohle, dauernde Geschiebe-Umlagerungen). An den Messstellen der Teileinzugsgebiete 2 und 4 ist aufgrund der natürlichen Gerinnesohle eine Querschnittsveränderung über die Messperiode nicht auszuschließen. Ebenso ist die hohe Gerinneneigung im Teileinzugsgebiet 1 eine Quelle der Unsicherheit, da die Abweichungen zwischen den verschiedenen Abflussformeln bei steilen Gefällen erheblich sein können.

Grundlegende Unsicherheiten entstehen durch die Gleichsetzung des topographischen Einzugsgebiets mit dem unbekannten hydrologischen Einzugsgebiet, was insbesondere die Berechnung des Abflussbeiwerts beeinflusst. Eine weitere Unsicherheitsquelle ist die Annahme einer homogenen Verteilung der Niederschläge über das gesamte Einzugsgebiet, ohne räumliche Interpolation oder Flächenabminderung – dazu stehen zu wenige Niederschlagsstationen zur Verfügung.

Die Tatsache, dass die Abflusshöhenmessung in 5 bzw. 10 Minuten-Intervalle und die Niederschlagsmessung im Intervall von einer Minute durchgeführt wurde, schränkt die zeitliche Beurteilung der Ganglinien etwas ein. Einen größeren Fehler in den zeitlichen Auswertungen der Ganglinie verursacht die Zugrichtung der Niederschlagszelle. Dieser kann jedoch analytisch durch Gruppierung der Daten einigermaßen beherrscht werden.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die zeitliche Komponente der Abflusshöhenmessung qualitativ hochwertig erfasst wurde und daher eine hohe Aussagekraft besitzt. Die Durchflussmessungen in Teileinzugsgebieten mit stabiler Gerinnesohle (1, 3, 5 und 6) weisen ebenfalls eine hohe Zuverlässigkeit auf. Im Gegensatz dazu sind die Messungen in Gebieten mit veränderlicher Sohle (2 und 4) kritisch zu hinterfragen und als weniger aussagekräftig einzustufen. Zudem weist auch der Pegel Rindbach an der Nicolaibrücke, insbesondere bei kleineren Ereignissen, signifikante Messfehler auf, wodurch sowohl die zeitliche Komponente als auch die quantitativen Werte mit Unsicherheiten behaftet sind.

Charakteristika der untersuchten Teileinzugsgebiete

Teileinzugsgebiet 1 weist eine schnelle, leicht verzögerte und dynamische Abflussbildung auf, welche nur von der gefallen Niederschlagsmenge beeinflusst wird. Die Teileinzugsgebiete 2 und 3 weisen zwar ähnliche topographischen Gegebenheiten und hydrologischen Charakteristika auf, sie reagieren jedoch sehr unterschiedlich auf Niederschlagsereignisse. Dies ist auf den hohen Anteil der unterirdischen Abflussfracht im Teileinzugsgebiet 3 zurückzuführen. Für das Teileinzugsgebiet 2 wäre abzuklären, ob topographisches und hydrologisches Einzugsgebiet übereinstimmen.

Teileinzugsgebiet 4 ist durch einen hohen Zwischenabfluss-Anteil und eine lineare Ganglinienform charakterisiert. Die Abflussbildungsprozesse sind stark von der Vorfeuchte beeinflusst, wobei bei hoher Vorfeuchte die Spitzenabflüsse signifikant ansteigen. Aufgrund der großen Fläche und der langen Fließwege ist die Abflussreaktion im Vergleich zu anderen Teileinzugsgebieten verzögert. Die Unsicherheiten in den Abflussmessungen sind vor allem auf die variierende Gerinnesohle zurückzuführen, was die Plausibilität insbesondere bei kleineren Ereignissen einschränkt. TEZG 5 reagiert aufgrund seiner geringen Größe und steilen Hangneigung deutlich schneller auf Niederschlagsereignisse als TEZG 6. Die hydrologischen Unterschiede zwischen den beiden Teileinzugsgebieten sind primär auf die topographischen Gegebenheiten zurückzuführen. Beide Pegel besitzen eine fixe Sohle und die ermittelten Durchflusswerte sind daher als aussagekräftig einzustufen.

Maßgebende Faktoren für die Abflussbildung

Die zeitliche Verteilung der Niederschläge und deren Intensität beeinflussen das Abflussgeschehen maßgeblich. Niederschlagsintensität, Niederschlagssumme und Niederschlagsdauer müssen dabei immer gemeinsam betrachtet werden. Hohe Abflussspitzen werden sowohl bei lang andauernden Niederschlägen mit geringer Intensität wie auch bei kürzeren Ereignissen mit hohen Niederschlagsintensitäten und mittlerer Niederschlagssumme erreicht.

Die Vorfeuchte hat ebenfalls eine große Auswirkung auf das Abflussgeschehen. Höhere Vorfeuchte bewirkt eine Steigerung der Abflussbeiwerte, das belegen die Auswertungen eindeutig. Der Einfluss der Vorfeuchte ist dabei in Teileinzugsgebieten mit einem hohen Interflow-Anteil maßgebender als in primär oberflächlich entwässernden Teileinzugsgebieten.

Zudem zeigte sich, dass stark ausgeprägte, teileinzugsgebietsspezifische Charakteristika wie „Karstspucklöcher“ und Karstquellen andere Faktoren überlagern und zu einem untypischen Abflussverhalten führen, dass primär von der gefallen Niederschlagsmenge abhängt.

Zusammenfassung

An drei repräsentativen Standorten wurden Beregnungsversuche durchgeführt, bei denen sowohl der Oberflächen- als auch der Zwischenabfluss gemessen wurden. Auf den Beregnungsflächen sowie auf einer Vergleichsfläche wurden Bodenproben entnommen, um bodenphysikalische Kennwerte zu bestimmen. Zudem wurden Fließhöhen Sensoren getestet und sechs Sensoren installiert, deren Messreihen im Zeitraum von Juli 2023 bis Oktober 2024 ausgewertet wurden. Auf Basis dieser Daten wurden Pegelschlüsselkurven erstellt und plausibilisiert, um die Abflussreaktionen verschiedener Teileinzugsgebiete auf Niederschlagsereignisse zu analysieren. Darüber hinaus wurden Landbedeckungs-, Abflussbeiwert- und Rauigkeitskarten erstellt. Im Rahmen der Untersuchungen erfolgten eine Teilgebietsgliederung sowie die Erhebung relevanter Gerinneparameter für das Modell ZEMOKOST. Erste Modellberechnungen mit ZEMOKOST wurden ebenfalls umgesetzt. Daten und Karten sind auf Zenodo bereitgestellt.

AP 6: Spezielle Landnutzung-Wald

Manfred Lexer, Nazli Golestani, Lorestani Arash, Hosseinivand Donya, Sanayei Armin

Arbeitspaket 6 widmet sich der Quantifizierung von Ökosystemleistungen im Rahmen der Forsteinrichtung, der Identifizierung von Optimierungspotentialen hinsichtlich Schutzwirkung gegen gravitative Naturgefahren auf Basis der adaptierten Forsteinrichtung sowie der Erhebung des Verjüngungszustandes bzw. Beurteilung des Regenerationszustandes im MEZG-Rindbach (inkl. Wildeinfluss).

Quantifizierung von Ökosystemleistungen im Rahmen der Forsteinrichtung

Waldökosysteme können durch eine zielorientierte nachhaltige Waldbewirtschaftung eine Vielzahl an Leistungen ermöglichen, die für die Gesellschaft von Bedeutung sind (Klimaschutzbeitrag durch CO_2 -Bindung, Lebensraum für Tier- und Pflanzenarten, Sicherung der Artenvielfalt, Sauerstoffproduktion, Luftfilterung und -kühlung, Erosionsschutz und Bodenbildung, Hochwasser- und Lawinenschutz, Wasserfilterung und Grundwasserspeicherung, Bereitstellung des Rohstoffs Holz und von Nahrung (Wildbret, Früchte), sowie Erholungs-, Gesundheitsfunktion und touristische Wertschöpfung). Ökosystemleistungen werden durch das menschliche Wirken zu Ökosystemdienstleistungen, wenn sich die Leistung gezielt verbessert. Die gleichzeitige Bereitstellung einer Vielzahl an Waldökosystemleistungen (u.a. Multifunktionalität, Mehrzweckwaldwirtschaft) hat in der europäischen Forstwirtschaft eine lange Tradition. Die europäische Forstpolitik (z.B. EU-2020-Strategie für Biodiversität, EU-2030-Politik für Klima- und Energiepolitik) beeinflusst dabei auch die Rahmenbedingungen für die Bereitstellung der Waldprodukte und der Waldökosystemleistungen. In den letzten Jahren gab es mehrere Initiativen, um das Bewusstsein der Gesellschaft für die Erbringung von Waldökosystemleistungen zu stärken und Mechanismen zu diskutieren, die Zahlungen für deren Aufrechterhaltung ermöglichen. Dabei wurden „Payments for Ecosystem Services“ (PES) als ein wichtiger Mechanismus identifiziert, um die Lücke zwischen den Anforderungen der Gesellschaft und den potenziellen Anbietern zu schließen.

Ein wichtiges Element stellen dabei die Erfassung des IST-Zustands von Waldökosystemleistungen und das laufende Monitoring dar. Eine kombinierte Erfassung von ausgewählten Zustandsindikatoren im Rahmen von Felderhebungen mittels Winkelzählproben und Teilflächentaxationen für die jeweils kleinste Planungseinheit (Bestand, Unterabteilung, Teilflächen) sowie eine GIS gestützte Analyse auf Basis vorhandener Geo-Daten hat sich dabei am geeignetsten erwiesen.

Um repräsentative Einzelbauminformationen zu erhalten, wurden in Teilflächen über einem Hektar (ha) Winkelzählproben (WZP)-Punkte in einem Proberaster angelegt. Die Einzelbauminformationen umfassen den Brusthöhendurchmesser (BHD), die Baumart, die Oberhöhe und die Höhe des Zentralstammes (Hz) je Baumart und WZP, sowie Anmerkungen (z.B. Schäden). Um eine robustere Aussage über die Einzelbauminformationen der Planungseinheit zu erlangen, werden Teilflächen mit ähnlichen Standortsbedingungen, Baumartenverteilung und Altersklasse zu Teilflächentypen in weiterer Folge zusammengefasst. Informationen dazu wurden in der ÖBf internen Taxation bereits 2022 aufgenommen und konnten verwendet werden. Indikatoren, welche bei den Felderhebungen nicht durch Winkelzählproben angesprochen wurden, wurden durch Teilflächentaxation erhoben. Dabei wurde auf dem Weg von den jeweiligen WZP-Punkten zum nächsten WZP-Punkt die Teilfläche erfasst. Am Ende der jeweiligen Teilflächentaxation wurden die Daten in ein Taxationsformular (siehe Abbildung 96) eingetragen. Bilder, welche bei den Felderhebungen geschossen wurden, wurden mittels Smartphone-App (QField) GPS-Koordinaten auf der GIS-Karte zugewiesen. Somit können die Bilder einem Punkt auf der Karte zugeordnet werden.

Abbildung 96 Taxationsformular für die Erhebung von Ökosystemleistungsindikatoren

Teilfläche:					
Bezeichnung	Indikatorausprägung	Bewertung der Indikator - Ausprägung nach Jahren (J)			
		aktuell	10 J	20J	50J
Naturnähe des Waldes (Referenz = PNWG)	natürlich				
	Natur nah				
	standortsgerecht				
	Natur fern				
Wildeinfluss	nicht relevant				
	nicht vorhanden				
	schwach				
	mittel				
Kronenansatz (% der Baumhöhe)	0-<33				
	33 - <50				
	50 bis <66				
	>66				
Salweiden	flächig				
	gruppen				
	einzeln				
	nicht vorhanden				
Bestandes- schlussgrad	gedrängt				
	geschlossen				
	locker				
	licht				
Verjüngung	räumdig				
	flächig vorhanden				
	vorhanden				
	mäßig vorhanden				
Totholzanteil	nicht vorhanden				
	stehend				
	liegend				
	Stöcke				
Aussichtsplätze	Sehr viel				
	viel				
	vorhanden				
	wenig				
Sonderstandorte	ja				
	nein				
	Fernsicht				
	Bank				
spez. Waldplätze	grenzt an Forststraße od. Wanderweg				
	Nassgalle				
	Quelle				
	Moor				
spez. Waldplätze	Bachlauf				
	Veteranenbaum				
	Wasserfall				
	Felsritze				
spez. Waldplätze	sonstiges				

Insgesamt sind 25 Indikatoren zur Beurteilung der Waldökosystemleistungen herangezogen worden, die jeweils eine unterschiedliche Bedeutung für die jeweilige Leistung aufweisen. Das bedeutet, dass manche Indikatoren (u.a. Totholz, Bestockung, Bestandesstruktur) auch für unterschiedliche Waldökosystemleistungen mehrfach zur Quantifizierung herangezogen werden können. Diese Indikatoren können ein Hinweis sein, auf eine zukünftige Ausrichtung der Forsteinrichtung, da sie eine Vielzahl an Optionen zur Quantifizierung von Ökosystemleistungen im Rahmen der Forsteinrichtung bieten. Beispielhaft ist die operative Quantifizierung der „Hangrutschsicherung“ inklusive der eingesetzten Indikatoren und Gewichte in Abbildung 97 dargestellt.

Abbildung 97 Indikatoren und Merkmalsausprägung für die Ökosystemleistung
„Hangrutschungssicherung“

Indikator- Bezeichnung	Priorität	Indikatorklassen	Kategorie
Hangneigung (%)	4	<30 30 bis <45 45 bis <60 60+ %	sehr gut gut mittel gering
Lückengröße (m²)	4	0 bis <400 400 bis < 600 600 bis <800 ≥800	sehr gut gut mittel gering
Bestockung	3	natürlich Natur nah standortsgerecht naturfern	sehr gut gut mittel gering
Baumarten (>1/10 der Fläche)	3	>3 3 2 1	sehr gut gut mittel gering
Bestandesschlussgrad	3	geschlossen locker licht räumdig od. gedrängt	sehr gut gut mittel gering
Wildeinfluss	2	nicht relevant nicht vorhanden schwach mittel stark	sehr gut sehr gut gut mittel gering
Verjüngung	2	flächig vorhanden vorhanden mäßig vorhanden nicht vorhanden	sehr gut gut mittel gering
vertikale Bestandesstruktur	2	plenterartig 3-schichtiger Bestand 2-schichtiger Bestand 1-schichtiger Bestand	sehr gut gut mittel gering
Sonderstandorte	1	≥3 2 1 0	gering mittel gut sehr gut
Totholz	1	sehr viel viel vorhanden wenig	gering mittel gut sehr gut

Beurteilung des Regenerationszustandes im MEZG-Rindbach

Die Baumverjüngung in Bergwäldern wird von verschiedenen ökologischen Faktoren beeinflusst, wobei Lichtverfügbarkeit und -konkurrenz eine entscheidende Rolle spielen. Die Fähigkeit von Keimlingen, sich im Unterholz zu etablieren und zu wachsen, wird oft von der Lichtmenge bestimmt, die durch das Kronendach dringt. In dichten Wäldern ist Licht eine begrenzte Ressource, und nur schattentolerante Arten können unter schwachen Lichtbedingungen überleben und wachsen (Kobe et al., 1995). Umgekehrt können durch natürliche Störungen wie Windwurf oder Abholzung entstandene Lücken im Kronendach die Lichtverfügbarkeit erhöhen und so die Regeneration lichtbedürftiger Arten fördern (Canham et al., 1994).

Die Konkurrenz zwischen Keimlingen sowie zwischen Jungwuchs und ausgewachsenen Bäumen um Licht, Wasser und Nährstoffe ist ein weiterer entscheidender Faktor, der die Dynamik der Waldverjüngung beeinflusst. In Gebirgswäldern, wo die Umweltbedingungen oft rau und die Ressourcen begrenzt sind, werden die Konkurrenzbeziehungen zwischen Pflanzen verstärkt. Die Etablierung und das Wachstum von Keimlingen sind in solchen Lebensräumen besonders herausfordernd, da die Konkurrenz um knappe Ressourcen den Erfolg der Verjüngung bestimmt (Kunstler et al., 2016). Die Fähigkeit von Keimlingen, effektiv um Licht, Nährstoffe und Wasser zu konkurrieren, ist entscheidend für ihr Überleben und Wachstum in diesen Ökosystemen (Forrester und Bauhus, 2016).

Darüber hinaus erschwert der Verbiss von Wildtieren wie Hirschen und anderen Schalen-tierarten die Baumverjüngung zusätzlich. Verbiss kann die Dichte und Zusammensetzung nachwachsender Baumarten erheblich beeinflussen, da selektiv Keimlinge und junge Bäume betroffen sind. Dies führt zu verringertem Wachstum, erhöhter Sterblichkeit und letztlich zu einer geringeren Verjüngungsrate (Kuijper et al., 2013). Hohe Dichten grasender Wildtiere können das Konkurrenzgleichgewicht zwischen Baumarten verschieben und häufig diejenigen begünstigen, die weniger schmackhaft sind oder spezifische Anpassungen entwickelt haben, um dem Verbiss standzuhalten (Speed, 2014).

In Regionen wie dem Rindbach ist der Einfluss des Verbisses besonders ausgeprägt, da jagd-freie Zonen und Störungen des Lebensraums die Populationen und das Verhalten der Wild-tiere beeinflussen. In diesen jagdfreien Zonen, in denen sich die Population von Hochwild während bestimmter Zeiträume unkontrolliert vermehren können, entsteht ein erhöhter Verbissdruck auf junge Bäume. Dies erschwert den Verjüngungsprozess, da die hohe Wild-dichte zu einem intensiven Verbiss von Keimlingen und Jungbäumen führen, was deren Wachstum und Überleben beeinträchtigt

Die spezifischen Umweltbedingungen des Waldes im Einzugsgebiet des Rindbaches, wie seine abwechslungsreiche Topographie, die Zusammensetzung des Mischwaldes sowie historische Störungen durch Windwürfe und Borkenkäferbefall, bieten ein einzigartiges Umfeld für die Untersuchung der Baumverjüngung. Diese Faktoren, kombiniert mit dem Verbissdruck, erschweren eine erfolgreiche Verjüngung ökonomisch und ökologisch wichtiger Baumarten wie der Buche (*Fagus sylvatica*) und der Fichte (*Picea abies*).

Eine wirksame Forstverwaltung in solchen Gebieten erfordert häufig Strategien zur Abschwächung der Auswirkungen des Verbisses, wie etwa kontrollierte Jagd, Einzäunung oder die Verwendung Verbiss resistenter Baumarten (Putman et al., 2011).

Im Rahmen des Projektes untersuchen wir die Verjüngungsdynamik im bewaldeten Einzugsgebiet des Rindbaches mit besonderem Fokus auf die Größenklassen und die Artenzusammensetzung der nachwachsenden Bäume. Unsere Analyse untersucht, wie sich Lichtverfügbarkeit und Verbissdruck auf verschiedene Größenklassen der Verjüngung (Keimlinge, kleine Jungbäume und hohe Jungbäume) auswirken und wie diese Faktoren den Verjüngungserfolg verschiedener Baumarten beeinflussen. Die spezifischen Ziele der Studie lauten daher wie folgt:

- (i) Festzustellen, wie sich die Lichtverfügbarkeit auf die Regeneration in verschiedenen Größenklassen auswirkt.
- (ii) Beurteilen, wie sich der Verbissdruck auf die Dichte und Zusammensetzung nachwachsender Baumarten auswirkt.
- (iii) Bewerten der unterschiedlichen Auswirkungen des Verbisses auf verschiedene Größenklassen der Regeneration.

Um diese Ziele zu erreichen, führten wir eine umfassende Untersuchung der Verjüngung im Rindbachwald durch. Dabei dokumentierten wir die Dichte und Größenklassen der nachwachsenden Bäume, bewerteten die Lichtverhältnisse anhand von „Hemiview“-Bildaufnahmen und evaluierten das Ausmaß des Verbissschadens. Unsere Ergebnisse werden zu einem tieferen Verständnis der Wechselwirkungen zwischen Licht und Verbissdruck mit der Artenzusammensetzung und den Größenklassen beitragen und so die Baumverjüngung beeinflussen.

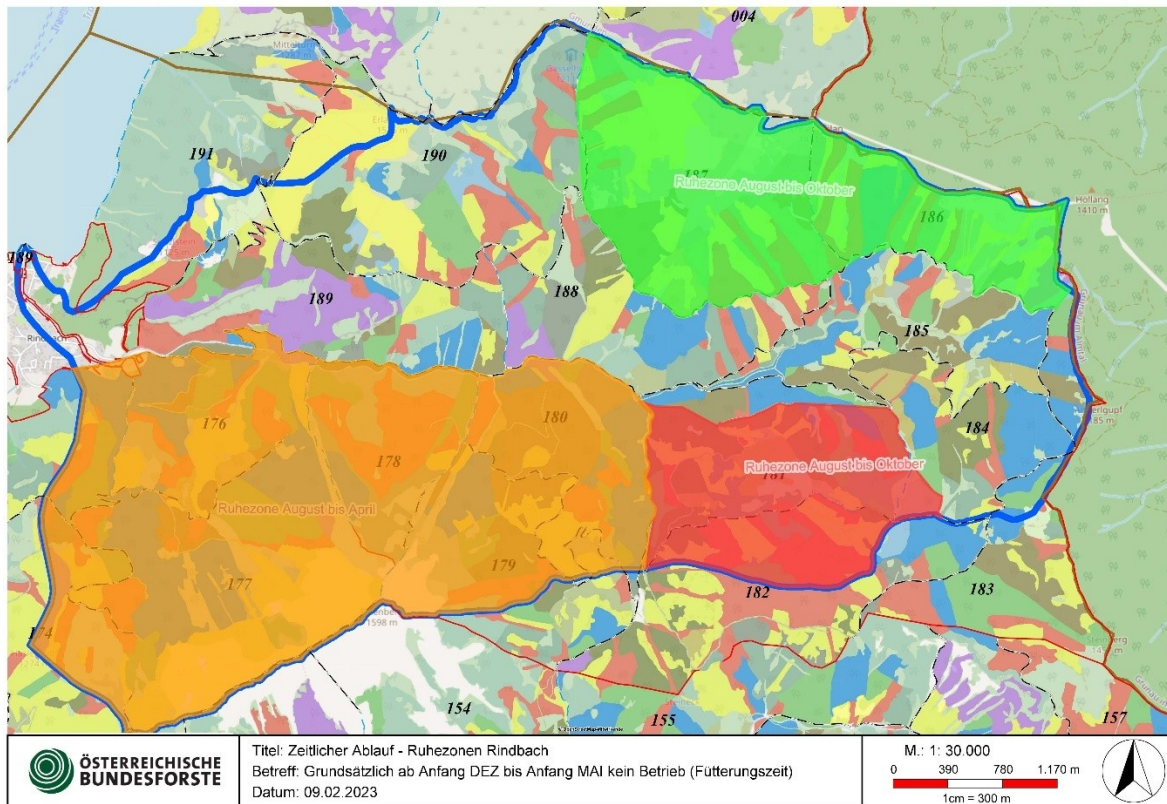
Feldaufnahmen

Der Wald des Rindbacheinzugsgebietes liegt in der alpinen Übergangszone und ist überwiegend von Fichten (*Picea abies*), Weißtannen (*Abies alba*) und Buchen (*Fagus sylvatica*) geprägt. Diese Wälder gehen allmählich in Nadelwälder über, in denen Lärchen (*Larix decidua*) und Weißtannen dominieren, wobei die Fichte mit zunehmender Höhe die Klimax darstellt.

Der Bau der Saline in Ebensee zwischen 1605 und 1607 führte zu erheblichen Abholzungen, da der umliegende Wald starkgenutzt Brennholz für die Salzproduktion (ca. 400–450 m³ Holz pro Woche). Diese historische Ausbeutung reduzierte die Waldbedeckung erheblich. Im Laufe der Zeit verschärfte sich die Situation zusätzlich durch starke Windwürfe, nachfolgende Borkenkäferkatastrophen und Lawinen, die zu weiteren großflächigen Abholzungen führten. Infolgedessen wird die Waldbedeckung im Rindbacheinzugsgebiet, die ursprünglich ca. 90 % betrug, heute auf ca. 60 % geschätzt.

Der im gesamten Einzugsgebiet des Rindbaches vorkommende Schalentierbestand v.a. Hirschbestand profitiert von drei jagdfreien Zonen mit Einschränkungen von August bis Oktober und einer, die bis April gilt (Abbildung 98).

Abbildung 98: Jagdfreie Zonen im Rindbach. Die grünen und roten Zonen gelten von August bis Oktober und die orangefarbene Zone von August bis April



Stichprobendesign und Datenerhebung

Um den Waldzustand und die Regenerationsfähigkeit im Waldbestand des Rindbaches zu beurteilen, wurden folgende Schritte durchgeführt:

- Polygone in Bezug auf ihren Waldtyp und ihre Zugänglichkeit wurden basierend auf einem regelmäßigen Raster über das gesamte Gebiet (300 x 300 m) ausgewählt. Informationen zu Altersklassen, Artenzusammensetzung und Vegetationstyp wurden von der ÖBF AG bereitgestellt (Abbildung 99).
- Unter diesen Polygonen wurden 26 Bestände basierend auf Zugänglichkeit und logistischer Effizienz ausgewählt. Dabei wurden Faktoren wie die Minimierung der Reisezeit, die Optimierung des Ressourceneinsatzes und die reibungslose Durchführung der Aufgaben innerhalb des vorgegebenen Zeitrahmens berücksichtigt. (Tabelle 23).
- Die Probepunkte wurden zunächst mithilfe der Software „Field Maps“ basierend auf vorhandenen Informationen ausgewählt. Anschließend wurden sie überprüft und gegebenenfalls angepasst, um sicherzustellen, dass sie die unterschiedlichen

Bedingungen innerhalb jedes Bestandes, wie beispielsweise die variierende Artenzusammensetzung und Vegetationstypen, genau repräsentieren.

- Die Datenerhebung erfolgte durch das Ausfüllen von Felderhebungsbögen gemäß dem Handbuch, wobei pro Bestand mindestens 4 feste Kreisflächen (Probepunkte) untersucht wurden. Aufgrund von Zugänglichkeitsbeschränkungen konnten jedoch nicht in allen Beständen vollständige Daten von 4 Flächen erhoben werden. Innerhalb jeder festen Kreisfläche wurden 4 Satellitenflächen um den Rasterpunkt angeordnet (Abbildung 100; Abbildung 103), die jeweils 4 m vom Zentrum in Nord-Süd- und Ost-West-Richtung positioniert waren. Insgesamt wurden zwischen dem 1. und 27. Juli 2023 Daten aus 77 Flächen erhoben.
- Um die Dichten, Höhenklassen, den Grad des Verbisses durch Rehwild, die Überschirmung durch den Oberstand, das Höhenwachstum sowie die Artenzusammensetzung der Verjüngung zu bewerten, wurden folgende Daten erfasst: (a) Zugänglichkeit und Bodeneigenschaften der festen Kreisfläche, (b) Merkmale des Mikrostandorts und (c) Merkmale der Verjüngung für jede Satellitenfläche.

Abbildung 99: Die türkisfarbenen Polygone stellen die zugänglichen Standorte dar, die auf einem regelmäßigen Raster basieren, das das gesamte Gebiet (300 x 300 Meter) abdeckt, während die roten Abschnitte die 26 untersuchten Standorte im Wald anzeigen

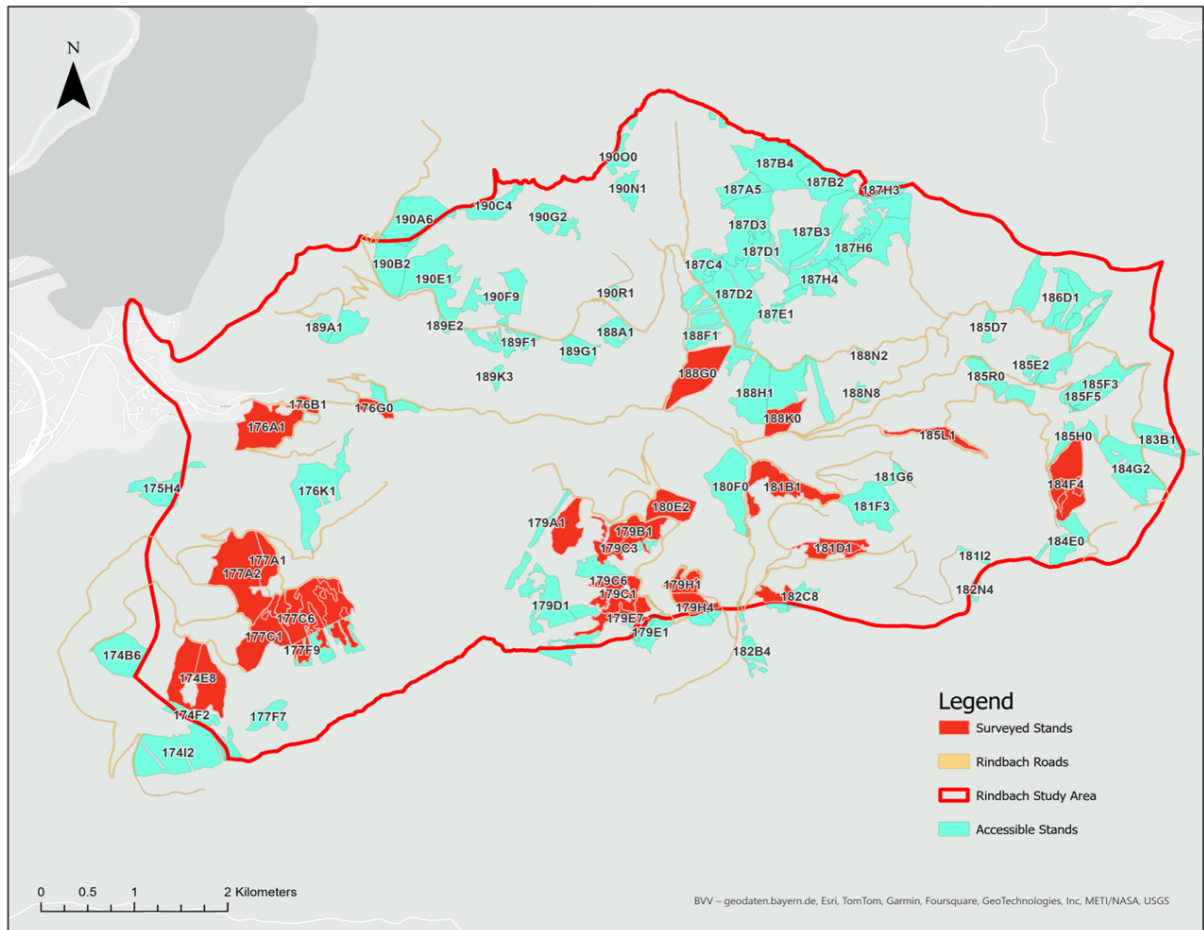


Abbildung 100 Der in rot eingefärbte Perimeter oben ist ein Beispiel für einen vermessenen Bestand (Polygon) mit vier festen kreisförmigen Parzellen (1 bis 4). Jede feste kreisförmige Parzelle enthielt vier Satellitenparzellen, die 4 Meter vom Zentrum entfernt sowohl in Nord-Süd- als auch in Ost-West-Richtung positioniert waren. In der Mitte jeder Satellitenparzelle wurde eine Kamera für hemisphärische Aufnahmen positioniert

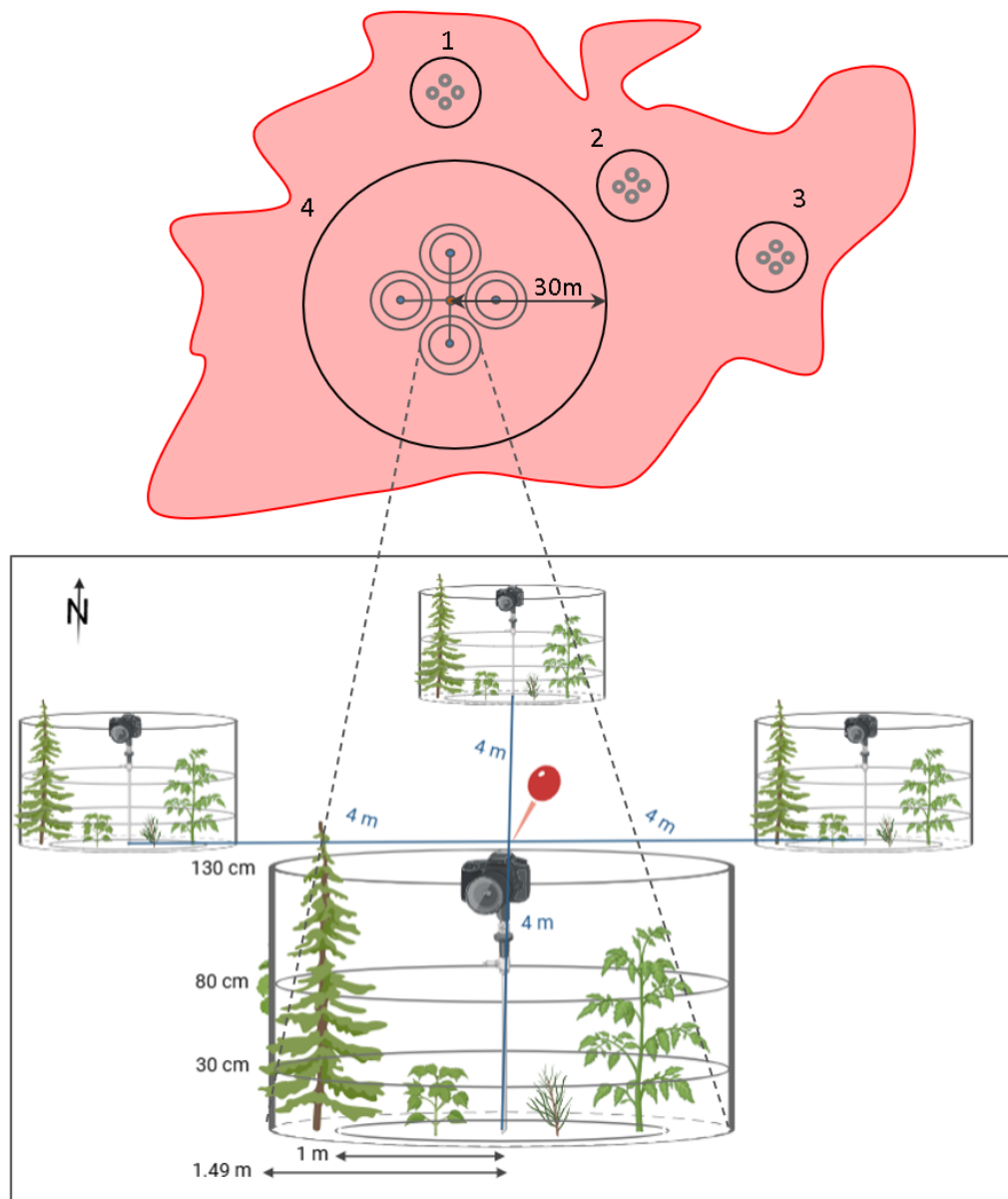


Tabelle 23 Verfügbare Felddaten des ÖBF für den Rindbach, einschließlich Artenzusammensetzung, Vegetationstyp und Einteilung in 8 Altersklassen für 26 untersuchte Bestände. Die Altersklassen sind wie folgt: Altersklasse 1 (0–20 Jahre), Altersklasse 2 (21–40 Jahre), Altersklasse 3 (41–60 Jahre), Altersklasse 4 (61–80 Jahre), Altersklasse 5 (81–100 Jahre), Altersklasse 6 (101–120 Jahre), Altersklasse 7 (121–140 Jahre) und Altersklasse 8 (141+ Jahre)

Stand Nr.	Stand ID	Standeigenschaften		
		Altersklasse	Artenzusammensetzung	Vegetationstyp
1	174E8	1	LH-Anteil > 50 %	Sauerklee, Waldschaumkraut-Typ
2	176A1	5	PA-Anteil ≥ 75 %	Waldmeister, Sanikel-Typ
3	176B1	5	PA-Anteil ≥ 75 %	Schneerose, Bingelkraut, Sauerklee-Typ
4	176G0	8	FS-Anteil ≥ 50 % und PA-Anteil ≥ 30 %.	Schneerose, Bingelkraut, Sauerklee-Typ
5	177A1	6	PA-Anteil ≥ 90 %	Sauerklee, Waldschaumkraut-Typ
6	177A2	5	PA-Anteil ≥ 80 %	Sauerklee-Schattenblümchen-Typ
7	177C1	5	PA-Anteil ≥ 50 %, FS-Anteil ≥ 20 % und der kombinierte Anteil von PA und FS ≥ 90 %.	Sauerklee, Waldschaumkraut-Typ
8	177C6	1	FS-Anteil ≥ 50 % und PA-Anteil ≥ 30 %.	Sauerklee, Waldschaumkraut-Typ
9	177F9	1	KON-Anteil > 50 %	Schneerose, Bingelkraut, Sauerklee-Typ
10	179B1	6	FS-Anteil ≥ 50 % und PA-Anteil ≥ 30 %.	Sauerklee, Waldschaumkraut-Typ
11	179B3	5	FS-Anteil ≥ 50 % und PA-Anteil ≥ 30 %.	Sauerklee-Schattenblümchen-Typ
12	179C1	6	FS-Anteil ≥ 50 % und PA-Anteil ≥ 30 %.	Sauerklee-Schattenblümchen-Typ
13	179C3	1	PA-Anteil > 10 %, FS-Anteil > 10 %, kombinierter Anteil von PA, AA und FS > 70 % und PA-Anteil > FS-Anteil.	Sauerklee-Schattenblümchen-Typ

Stand Nr.	Stand ID	Standeigenschaften		
		Altersklasse	Artenzusammensetzung	Vegetationstyp
14	179E7	1	PA-Anteil ≥ 50 %, FS-Anteil ≥ 20 % und der kombinierte Anteil von PA und FS ≥ 90 %.	Sauerklee, Waldschaumkraut-Typ
15	179H1	6	FS-Anteil ≥ 50 %, AA-Anteil ≥ 10 % und der kombinierte Anteil von PA, FS und AA ≥ 80 %.	Sauerklee, Waldschaumkraut-Typ
16	179H4	1	LD-Anteil ≥ 90 %.	Sauerklee-Schattenblümchen-Typ
17	180E2	5	FS-Anteil ≥ 50 % und PA-Anteil ≥ 30 %.	Sauerklee, Waldschaumkraut-Typ
18	181B1	6	FS-Anteil ≥ 50 % und PA-Anteil ≥ 30 %.	Sauerklee-Schattenblümchen-Typ
19	181D1	7	FS-Anteil ≥ 50 % und PA-Anteil ≥ 30 %.	Sauerklee-Schattenblümchen-Typ
20	181D8	1	FS-Anteil ≥ 50 % und PA-Anteil ≥ 30 %.	Bingelkraut, Heidelbeer-Typ
21	182C9	1	LD-Anteil ≥ 90 %.	Sauerklee, Waldschaumkraut-Typ
22	184F1	7	PA-Anteil > 10 %, FS-Anteil > 10 %, kombinierter Anteil von PA, AA und FS > 70 % und PA-Anteil $>$ FS-Anteil.	Sauerklee-Schattenblümchen-Typ
23	184F4	1	PA-Anteil ≥ 90 % und LH vorhanden.	Sauerklee-Schattenblümchen-Typ
24	185L1	6	PA-Anteil ≥ 50 %, FS-Anteil ≥ 20 % und der kombinierte Anteil von PA und FS ≥ 90 %.	Bingelkraut, Heidelbeer-Typ
25	188G0	7	FS-Anteil ≥ 50 % und PA-Anteil ≥ 30 %.	Bingelkraut-Typ
26	188K0	8	FS-Anteil ≥ 50 % und PA-Anteil ≥ 30 %.	Bingelkraut-Typ

Anmerkung 1: PA = Fichte (*Picea abies*), LD = Europäische Lärche (*Larix decidua*), FS = Europäische Buche (*Fagus sylvatica*), AA = Europäische Weißtanne (*Abies alba*), CON = Nadelbaum, LH = Laubbaum.

Anmerkung 2: Waldmeister= *Galium odoratum*, Sanikel= *Sanicula europaea*, Sauerklee= *Oxalis*, Waldschaumkraut= *Cardamine flexuosa*, Schattenblümchen= *Maianthemum racemosum*, Bingelkraut= *Mercurialis* sp., Schneerose= *Helleborus niger*, Heidelbeer= *Vaccinium myrtillus*

Merkmale der festen Kreisfläche

Die Standorte jeder festen Kreisfläche (Probepunkt) in den Beständen wurden mithilfe der Software 'Field Maps' vorab ausgewählt, wobei die spezifischen Merkmale des Bestandes, die strukturelle Zusammensetzung und die Zugänglichkeit sorgfältig berücksichtigt wurden. Diese Standorte wurden anschließend überprüft und bei Bedarf angepasst. Jede Fläche wurde mit einer Bambusstange markiert und auf ihre Zugänglichkeit hin bewertet, um ihre Eignung für die Holzernte zu bestimmen. Dabei wurden Faktoren wie die Entfernung zur nächstgelegenen, für LKW befahrbaren Forststraße (in Metern gemessen), die Machbarkeit von Rückegassen, Bodenschleppung und Seilkranbringung berücksichtigt. Zusätzlich zur Bewertung der Zugänglichkeit wurden Messungen des Humustyps und der Humusdicke durchgeführt, um die Menge des auf dem Waldboden angesammelten Humus zu bestimmen. Dieser kann als Barriere für die Etablierung von Arten aus der Samenbank wirken (Facelli et al., 1991). Die Bedingungen auf dem Grundstück wurden durch Fotos dokumentiert, die mit einer Handkamera aufgenommen wurden, und die Koordinaten wurden per GPS aufgezeichnet.

Merkmale des Mikrostandorts in der Satellitenfläche – Bodenvegetation

Zur Charakterisierung des Mikrostandorts wurde nach dem Platzieren der Bambusstange im Zentrum jeder Satellitenfläche der Mikrostandorttyp als prozentuale Deckung innerhalb der 1,49-Meter-Satellitenfläche erfasst. Dabei wurden verschiedene Kategorien wie Mineralboden, Streu, Bodenvegetation, Holzanteile und Kombinationstypen unterschieden. Zusätzlich wurden die Höhenmessungen und Zersetzungsklassen für abgestorbene Holzanteile dokumentiert. Die Gesamtsumme der Deckung aller Kategorien musste 10 ergeben (Tabelle 24; Abbildung 101).

Totholz gilt als wichtiger Indikator für die Biodiversität und beeinflusst maßgeblich die Kohlenstoffvorräte und -flüsse im Wald (Russell et al., 2015; Parajuli und Markwith 2023). Seine Integration in die Nationalen Forstinventare (NFI) führte in Finnland, Norwegen und Schweden zur Entwicklung von Zerfallsklassen, die die Qualität des Holzes anhand visueller und taktiler Kriterien bewerten (Storaunet und Rolstad, 2015; Jonsson et al., 2016; Korhonen et al., 2021). Dieses Klassifizierungssystem hat sich über ein Jahrhundert im Rahmen von NFI-Programmen entwickelt und unterteilt Totholz in verschiedene Zerfallsklassen, darunter grobe, kürzlich abgestorbene oder harte Totholzfraktionen innerhalb des gesamten Totholzbestands (Tabelle 25).

Darüber hinaus wurde jedes Satellitenfeld anhand einer Bewertung von 0 bis 10 in Mikrostandortqualitäten von sehr gut bis sehr schlecht für die Regeneration eingeteilt. Diese Kategorien spiegeln wider, wie sich die Mikrostandortigenschaften positiv oder negativ auf die Regenerationsfähigkeit der Pflanzen auswirken. Dieser Prozess wurde von einem einzelnen Gutachter durchgeführt, um eine einheitliche und konsistente Bewertung der Mikrostandortigenschaften zu gewährleisten.

Tabelle 24 Jeder Mikrostandorttyp (Mineralien, Streu, Bodenvegetation, Gehölzteile usw.) wird bewertet und ihm wird basierend auf seinem Anteil innerhalb einer 1,49 Meter großen Satellitenfläche eine bestimmte Anzahl von Bedeckungseinheiten zugewiesen. Für jeden Mikrostandorttyp werden Definitionen bereitgestellt, um ihn genau identifizieren und charakterisieren zu können. Die beobachtete Gesamtmenge der Bodenbedeckung wird auf maximal 10 Einheiten skaliert, was als Prozentskala (d.h.: 0 bis 100 %) interpretiert werden kann. Dieser standardisierte Ansatz gewährleistet eine konsistente und systematische Bewertung der Mikrostandortmerkmale über verschiedene Flächen hinweg und ermöglicht genaue Vergleiche und Analysen

Microsite-Gruppe	Microsite-Type	Definition
Mineralisch	Mineralboden	Keine Streu- oder Vegetationsdecke, mineralischer Boden freigelegt
	Felsen	Grundgestein, Felsbrocken
Wurf	Blätter	Die Einstreu besteht überwiegend (>75% Deckung) aus Laub
	Nadel	Die Einstreu besteht überwiegend (>75% Deckung) aus Nadeln
	Blattnadel	Die Streu besteht sowohl aus Blättern als auch aus Nadeln (gemischt, wobei jedes über 25 % der Bedeckung ausmacht)
Bodenvegetation	Moos	Moos auf dem Boden
	Gras	Gräser dominieren
	Kraut	Krautige Pflanzen dominieren (Höhe < 50 cm)
	Hohes Kraut	Krautige Pflanzen dominieren (Höhe > 50 cm)
	Farn	Farne dominieren
	Brombeere	Dominante Himbeer- oder Brombeerdecke
	Zwergstrauch	Zwergsträucher (Heidelbeere, Preiselbeere, Alpenrose etc.) dominieren
Holz	Baum	Lebende Baumhöhe > 1,3 m

Microsite-Gruppe	Microsite-Type	Definition
	Stehendes Totholz	Stehendes Totholz > 1,3 m
	Stumpf	Stehendes Totholz < 1,3 m, Stubben, Wurzelteller
	Gefallenes Totholz	Abgefallenes Totholz (mittlerer Durchmesser > 7 cm)
	Äste	Astmaterial (mittlerer Durchmesser < 7 cm) und Rindenstücke
	Wurzeln	Wurzeln lebender Bäume
Kombinationsarten	Usw.	Weitere Details wurden aufgenommen

Tabelle 25 Das Klassifizierungssystem des NFI (Schwedisches Nationales Waldinventar) für Totholzzersetzungsclassen.

Nationales Waldinventar-Klassifizierungssystem	
Dekompositionsklasse	
0	Frisch abgestorbenes Holz: Kürzlich abgestorben, noch nicht ausgetrocknet.
1	Massives Totholz: Das Volumen besteht zu 90 % aus Massivholz mit harter Oberfläche. Das Holz ist in geringem Maße von holzerstörenden Organismen befallen.
2	Teilweise zersetztes Holz: Das Volumen besteht zu 10-25 % aus Weichholz. Der Rest ist massiv.
3	Zersetztes Holz: Das Volumen besteht zu 26–75 % aus Weich- oder sehr Weichholz.
4	Stark zersetztes Holz: Das Volumen besteht zu 76–100 % aus weichem oder sehr weichem Holz. Ein Werkzeug kann durch den Stamm gedrückt werden, es kann jedoch ein harter Kern vorhanden sein.

Abbildung 101 Bewertung der Zusammensetzung von Mikrostandorten durch Erfassung des prozentualen Anteils von Mineralien, Streu, Vegetation und Holz innerhalb einer Fläche von 1,49 Metern, wobei ein Pfahl als Mittelpunkt für eine genaue Kategorisierung dient



Merkmale des Mikrostandorts in der Satellitenfläche – Kronenschluss

Hemisphärische Kronendach-Fotografien sind eine effiziente und wiederholbare Methode, um die Sonneneinstrahlung, die unter das Kronendach dringt, und die Verteilung der Kronendach-Öffnungen an einem bestimmten Standort abzuschätzen (Rich, 1990). Um die Kronendach-Situation zu bestimmen und die Lichtverhältnisse im Unterholz auf den Flächen zu dokumentieren, wird in jedem Satelliten-Parzellenzentrum ein oder mehr halbkugelförmige Fotografien wurden aufgenommen, Blick nach oben vom Waldboden mit einer hochauflösenden Digitalkamera Canon EOS 6D mit einem Sigma 8 mm 180°Fischaugenobjektiv, nach Norden und horizontal ausgerichtet mit Hilfe eines Einbein-Statives, das in 1,3 Metern Höhe über dem Boden und den Regenerationsanlagen befestigt ist, und einer selbstnivellierenden Delta-T-Montierung mit Wasserwaage und Kompass.

Laut der Bedienungsanleitung von HemiView Photograph sollten Fotos idealerweise bei gleichmäßig bedecktem Himmel oder zu Zeiten aufgenommen werden, in denen die Sonne nicht direkt am Himmel steht, um einen klaren Kontrast zwischen Baumkronendach und Himmel für eine genaue Analyse zu gewährleisten. Leider waren optimale Bedingungen in den Sommermonaten nicht immer gegeben. Daher konnten für bestimmte Bereiche keine HemiView-Fotos aufgenommen werden. Da Blendung die Klassifizierung von schattigen und sonnenbeschienenen Bereichen durch HemiView beeinträchtigen kann, war für die Analyse eine Vorverarbeitung der Fotos erforderlich.

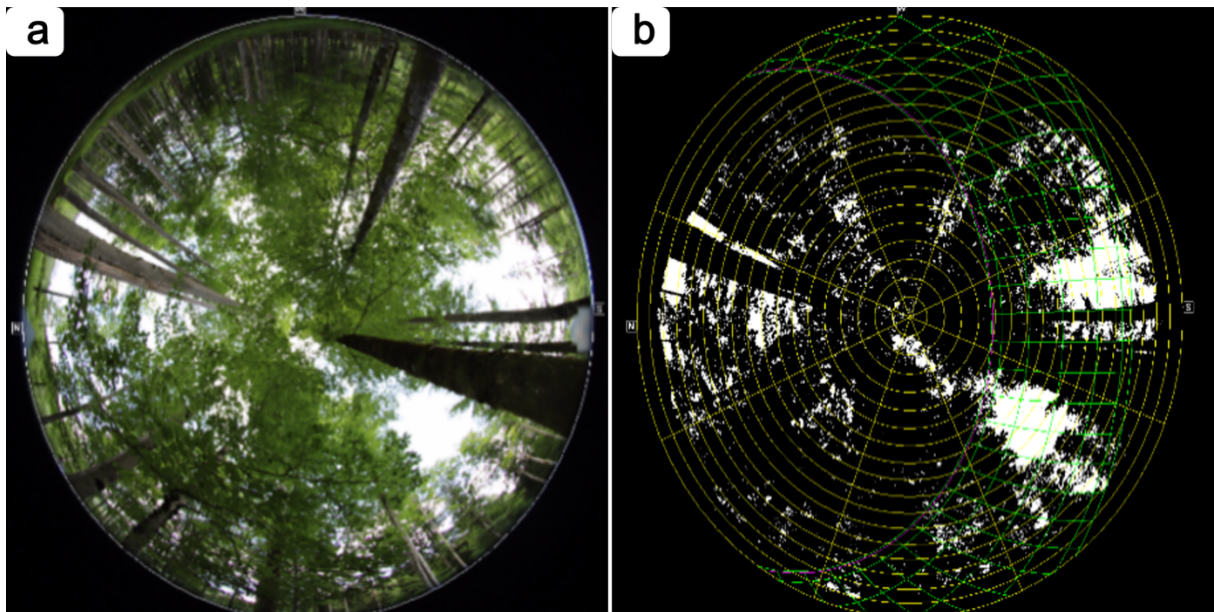
Um das Risiko einer signifikanten Veränderung der Analyseergebnisse zu minimieren, wurde die Bearbeitung auf ein Minimum beschränkt und mit GIMP 2.10.34 durchgeführt. Wenn durch Sonnenblendung Licht als Schatten oder umgekehrt fehlklassifiziert wurde, wurden das „Freie Auswahlwerkzeug“ und das „Stempelwerkzeug“ eingesetzt, um die Helligkeit bzw. Dunkelheit von Sonnenflecken oder Vegetationsteilen anzupassen.

Nachdem die Fotos für die Bearbeitung vorbereitet waren, wurden sie mit der Software zur Kronendachanalyse HemiView 2.1 SR5 ausgewertet. Zusätzlich werden verschiedene Parameter benötigt, darunter die Höhe der Standorte, die magnetische Deklination des Standorts, die Auswahl des jeweiligen Tages und die Ausrichtung der Fotos nach Norden. Diese Parameter ermöglichen es der Software, den Sonnenverlauf auf den Fotos zu bestimmen und diese präzise zu analysieren.

Nach der Einstellung dieser Parameter in der Software ist eine manuelle Anpassung des Schwellenwerts erforderlich, um Schatten und Sonne zu klassifizieren. Dieser Prozess wandelt das Foto in ein Binärbild um, wobei Weiß Bereiche mit einfallender Sonneneinstrahlung und Schwarz schattige Bereiche anzeigt. Der Schwellenwert wird anschließend angepasst, um sicherzustellen, dass die Klassifizierung des Bildes möglichst genau der Vegetations- und Lichtverteilung im Originalfoto entspricht (Abbildung 102).

Daher verwendet die HemiView-Software das halbkugelförmige Bild zusammen mit Standort- und Datumsdaten, um Kronendachstrukturfaktoren wie Lückenanteil und Blattflächenindex (LAI) zu berechnen und die Strahlungswerte über und unter dem Kronendach vorherzusagen und somit direkte (DSF), indirekte (ISF) und globale Standortfaktoren (GSF) des Ortes, an dem das Foto aufgenommen wurde (Anderson, 1966).

Abbildung 102 Beispiel für eine hemisphärische Fotografie, bei der der Zenit in der Bildmitte liegt und nach Norden ausgerichtet ist (a), unterteilt in 18 Azimut- und 8 Zenitbereiche in der Himmelskarte und mit angepasstem Schwellenwert (b). Diese Unterteilungen helfen dem Programm, die Baumkronenstrukturen und die Sonnenstrahlungstransmission genauer zu berechnen. Die Ost- und Westausrichtung ist aufgrund der Aufwärtsansicht anstelle der Abwärtsansicht gegenüber der üblichen Kartenkonvention umgekehrt



Daten zur Baumregeneration– Keimlinge und Jungbäume

In jedem Satellitenfeld wurden Keimlinge und Jungbäume jeder Art nach Höhenklassen klassifiziert und in zwei Regenerationskreisen mit Radien von 1,0 und 1,49 Metern auf Anzeichen von Wildverbiss untersucht. Keimlinge (0–30 cm) wurden im inneren Kreis ($r = 1,0$ m) bewertet, während niedrige Jungbäume (31–80 cm) und hohe Jungbäume (81–130 cm) im größeren Kreis ($r = 1,49$ m) bewertet wurden. (Abbildung 103).

Für jede Pflanze wurden Angaben zu Art, Höhenklasse und Verbissstatus (einschließlich neuer und alter Verbiss Spuren) erfasst. Der Anteil der verbissenen Pflanzen wurde für den Verbiss an Endtrieben (sowohl aktuelle als auch alte) und Seitentrieben (wenn mehr als 25 % der potenziellen Blattbiomasse verbissen waren) erfasst, insbesondere in Fällen, in denen der Endtrieb nicht verbissen war.

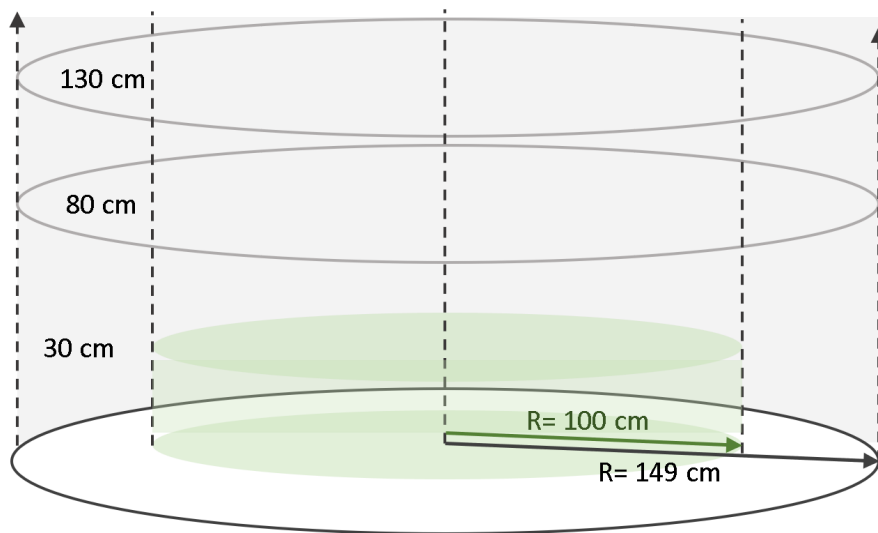
In der Literatur werden Verjüngungspflanzen, die kleiner als 3 cm sind, üblicherweise als noch nicht etabliert angesehen (Kuuluvainen und Kalmari, 2003). Fichtenkeimlinge können

diese Höhe jedoch innerhalb eines Jahres erreichen und im dritten oder vierten Jahr 10 cm groß werden. Daher wird der Schwellenwert, ab dem diese Pflanzen als etabliert gelten, auf 10 cm angehoben. Um die Dichte der Verjüngungspflanzen in dieser Größenklasse zu bestimmen, wird daher auch die Anzahl der Pflanzen pro Baumart, die kleiner als 10 cm sind, im inneren Kreis der Satellitenfläche erfasst.

In den ersten Aufnahmen wurden die Verjüngungspflanzen je nach Baumart und Verbiss Kategorie in spezifische Höhenkategorien eingeteilt: 10–30 cm, 31–50 cm, 51–80 cm und 81–130 cm. Im Laufe der Analyse wurden diese Kategorien jedoch in drei Hauptgruppen zusammengefasst:

- HC1 (Keimlinge): Deckt Pflanzen mit einer Höhe von 0–30 cm ab.
- HC2 (Kurze Jungbäume): Umfasst Pflanzen mit einer Höhe von 31–80 cm.
- HC3 (Große Jungbäume): Umfasst Pflanzen mit einer Höhe von 81–130 cm. Diese Anpassung wurde vorgenommen, um den Analyseprozess zu vereinfachen und gleichzeitig eine klare Beurteilung der Wachstumsstadien und -merkmale der Pflanzen zu gewährleisten.

Abbildung 103 Schema einer Parzelle in denen alle Keimlinge (0–30 cm) im inneren Kreis (grüner Zylinder) und alle kurzen und hohen Jungbäume (30–130 cm) im größeren Kreis (grauer Zylinder) erfasst, nach Arten identifiziert, in Höhenklassen eingeteilt und auf alte oder neue Verbissschäden untersucht. Junge Bäume mit einer Höhe von mehr als 130 cm wurden ebenfalls erfasst wobei ihr Brusthöhendurchmesser (DBH) in zwei Kategorien eingeteilt wurde: 0–4 cm und 4–8 cm. Diese jungen Bäume wurden einer weiteren Bewertung hinsichtlich der Artenidentifizierung unterzogen und auf neue oder alte Verbissschäden und Entrindungsschäden untersucht



Daten zur Baumregeneration– Jungwuchs

Neben der Erfassung von Keimlingen und des Jungwuchses wurde innerhalb einer größeren kreisförmigen Fläche (Radius = 1,49 m) eine separate Gruppe für Bäume mit einer Höhe von über 130 cm eingerichtet. Diese Bäume wurden weiter in zwei unterschiedliche Brusthöhendurchmesser-Kategorien (BHD) eingeteilt: 0–4 cm und 4–8 cm. Für jeden Baum dieser Gruppe wurden detaillierte Aufzeichnungen geführt, in denen Informationen zur jeweiligen Art festgehalten wurden. Zusätzlich wurde untersucht, ob die Bäume unbeschädigt, abgenagt oder geschält waren. Dabei wurde sorgfältig vermerkt, ob beobachtete Schäden neu oder älter waren.

Daten zur Baumregeneration– Höhenzuwachs Leittrieb

Um den Höhenzuwachs des Leittriebs genau bestimmen zu können, wurden für jede Höhenklasse zwei gesunde, möglichst unverbissene und kräftige Exemplare pro Baumart ausgewählt. Für jedes dieser Exemplare wurden detaillierte Aufzeichnungen geführt, darunter

Art, Höhe und jährliche Wachstumszuwächse der letzten zwei Jahre. Diese Zuwächse wurden für jedes Jahr einzeln erfasst, wobei der Trieb des aktuellen Jahres nicht berücksichtigt wurde.

Zusätzlich zu den Wachstumsmessungen wurde der Verbisschaden detailliert erfasst. Dabei wurde zwischen den Kategorien „nicht verbissen“ und den Verbissarten „nur Seitentriebe“, „nur Terminaltrieb“ oder „sowohl Seiten- als auch Terminaltriebe“ unterschieden. Darüber hinaus wurden Frostschäden, sowohl direkte als auch indirekte, sowie andere Schadensarten dokumentiert. Diese umfassende Datenerhebung zielte darauf ab, ein tiefgehendes Verständnis der Wachstumsdynamik und der Herausforderungen bei der Verjüngung zu ermöglichen.

Daten zur Baumregeneration– Samenbäume

Um Informationen über das Reproduktionspotenzial verschiedener Baumarten zu erhalten und die Artenvielfalt sowie natürliche Regenerationsprozesse zu bewerten, wurden die Verfügbarkeit und Identifizierung fruchttragender Baumindividuen nach Arten in einem Umkreis von 30 m um den Rasterpunkt durchgeführt.

Statistische Analysen

Die statistischen Analysen wurden mit der Software RStudio (Version 4.2.2) durchgeführt und visualisiert. Der Schwerpunkt der Studie lag auf den vier vorherrschenden Baumarten: Buche, Fichte, Esche, Weißtanne und Bergahorn. Die Analysen umfassten sowohl kombinierte Artendaten als auch spezifische Analysen, die auf jede einzelne Art zugeschnitten waren.

Zunächst wurden die Rohdaten zur Anzahl der Keimlinge, der kleinen und großen Schösslinge sowie der einzelnen Bäume mit einer Höhe von über 130 cm und einem Brusthöhendurchmesser (BHD) von weniger als 8 cm, die auf den Parzellen gewonnen wurden, in Dichten umgerechnet, die als Anzahl der Bäume pro Hektar ausgedrückt werden, um standardisierte Vergleiche und eine quantitative Bewertung der Baumbestandsdichten im gesamten Untersuchungsgebiet zu ermöglichen.

Darüber hinaus wurde eine zusätzliche Aggregation durchgeführt, um die Analyse zu erweitern. Konkret wurde der Durchschnitt von jeweils vier Satellitenflächen (Nord, Süd, West und Ost) innerhalb einer Fläche berechnet, um einen repräsentativen Wert für diese Fläche

abzuleiten. Um ein größeres Gebiet abzudecken und die statistische Zuverlässigkeit zu erhöhen, wurde ein ähnliches Mittelungsverfahren auf mindestens vier Flächen innerhalb jedes Polygons angewendet. Dieser Schritt lieferte eine gemittelte Darstellung der Verjüngungsdichten auf Bestandsebene und ermöglichte so eine robuste Bewertung durch die Reduzierung potenzieller Variabilität innerhalb einzelner Bestände.

Anschließend wurden Berechnungen durchgeführt, um die prozentualen Artenverteilungen zu bestimmen und die Höhenklassenverteilungen für alle Arten mit Verbissvorkommen zu bewerten, einschließlich Verjüngungen von 0 bis über 130 cm Höhe mit einem BHD von weniger als 8 cm, mit besonderem Augenmerk auf dem Höhenbereich von 0-130 cm (Tabelle 25; Tabelle 27; Abbildung 107).

Zusätzlich wurden lineare Regressionsmodelle verwendet, um die Korrelation zwischen dem Strahlungsregime unter dem Kronendach und der Dichte der Verjüngung (< 130 cm Höhe) zu untersuchen. Dieser statistische Ansatz ermöglicht eine detaillierte Analyse, wie Unterschiede in der Sonneneinstrahlung die Verteilung und Dichte des Nachwuchses beeinflussen (Abbildung 108). Darüber hinaus wurde der Einfluss des Blattflächenindex (LAI) auf den Höhenzuwachs der Arten in den letzten zwei Jahren untersucht (Abbildung 109). Boxplot-Diagramme (Box-and-Whisker-Plots) wurden verwendet, um zu analysieren, wie die Merkmale des Mikrostandorts die Dichte und Höhenverteilung der Verjüngung von vier häufigen Baumarten beeinflussen (Abbildung 110).

Abschließend wurde eine umfassende Analyse mithilfe linearer Regressionsmodelle durchgeführt, um zu untersuchen, wie sich der Verbiss von Pflanzenfressern auf verschiedene Baumarten in unterschiedlichen Höhenklassen auswirkt. Dabei wurde auch der Einfluss des Verbissdrucks auf die Regenerationsdynamik untersucht. Ökologische Faktoren wie die Baumartenzusammensetzung wurden ebenfalls berücksichtigt, da sie entscheidend für die Schmackhaftigkeit der Vegetation für Pflanzenfresser sind. Durch die Untersuchung der Verbissauswirkungen in verschiedenen Höhenklassen (von jungen Bäumen bis hin zu Einzelbäumen mit einer Höhe von über 130 cm und einem BHD von weniger als 8 cm) zielte die Forschung darauf ab, Muster und deren Auswirkungen auf die Dynamik der Waldverjüngung zu klären.

Tabelle 26 Anzahl der pro Baumart beobachteten Keimlinge, niedrigen und hohen Jungwuchs, zusammen mit dem Verbissaufkommen und der Höhenklasse (HC), wobei HC1, HC2 und HC3 Höhenbereichen von 0–30 cm, 31–80 cm bzw. 81–130 cm entsprechen. HC1-Messungen wurden im inneren Kreis durchgeführt, während HC2- und HC3-Messungen im größeren Kreis innerhalb jedes Satellitenplots durchgeführt wurden. Zusätzlich wurde die Anzahl junger Bäume mit einer Höhe von über 130 cm und einem Durchmesser von weniger als 8 cm erfasst und anhand ihres Brusthöhendurchmessers in Gruppen eingeteilt: 0–4 cm und 4–8 cm. Diese Bäume wurden weiter in beschädigte und unbeschädigte Kategorien unterteilt, wobei beschädigte Bäume in solche unterteilt wurden, die von Wildtieren abgefressen oder geschält wurden

Baumart	< 130 cm						> 130 cm					
	HC1		HC 2		HC 3		0-4		BHD (cm)			
	Verb	Unverb	Verb	Unverb	Verb	Unverb	Verb	Gesch	Unge- schä- digt	4-8		Unge- schädigt
										Geschädigt	Gesch	
Fagus sylvatica	220	69	255	23	142	28	167	4	83	11	1	1
Fraxinus excelsior	323	48	181	11	26	0	8	0	0	0	0	0
Acer pseudo-platanus	243	97	52	6	7	0	9	0	0	0	0	0
Ulmus glabra	9	17	15	3	2	1	3	0	1	2	1	0
Sorbus aucuparia	16	14	6	1	1	0	0	0	0	0	0	0
Sorbus aria	6	3	1	0	0	0	3	0	0	0	0	0
Salix alba	3	0	2	0	2	0	3	0	3	0	0	0
Corylus avellana	1	0	4	0	1	0	4	0	2	0	0	4
Populus tremula	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Picea abies	97	133	61	34	18	9	54	6	50	3	0	3
Abies alba	3	5	2	2	0	0	0	0	1	0	0	0
Larix decidua	0	0	1	1	3	3	3	6	1	0	0	0
Total	921	386	581	81	202	41	254	16	141	16	2	8

Tabelle 27 Vier dominante Arten in drei Höhenklassen repräsentieren zusammen fast 94 % der Verjüngung (0–130 cm), und die restlichen acht Arten machen die restlichen 6 % aus.

Baumarten	Höhenklassen			Gesamt
	HC 1 %	HC 2 %	HC 3 %	
<i>Fagus sylvatica</i>	13.07	12.57	7.69	33.33
<i>Fraxinus excelsior</i>	16.77	8.68	1.18	26.63
<i>Acer pseudoplatanus</i>	15.37	2.62	0.32	18.31
<i>Picea abies</i>	10.40	4.29	1.22	15.91
Gesamt (4 Dominante)	55,61	28.16	10.40	94,17
Sonstige	3,48	1,76	0,59	5,83
Gesamt	59,09	29,92	10,99	100

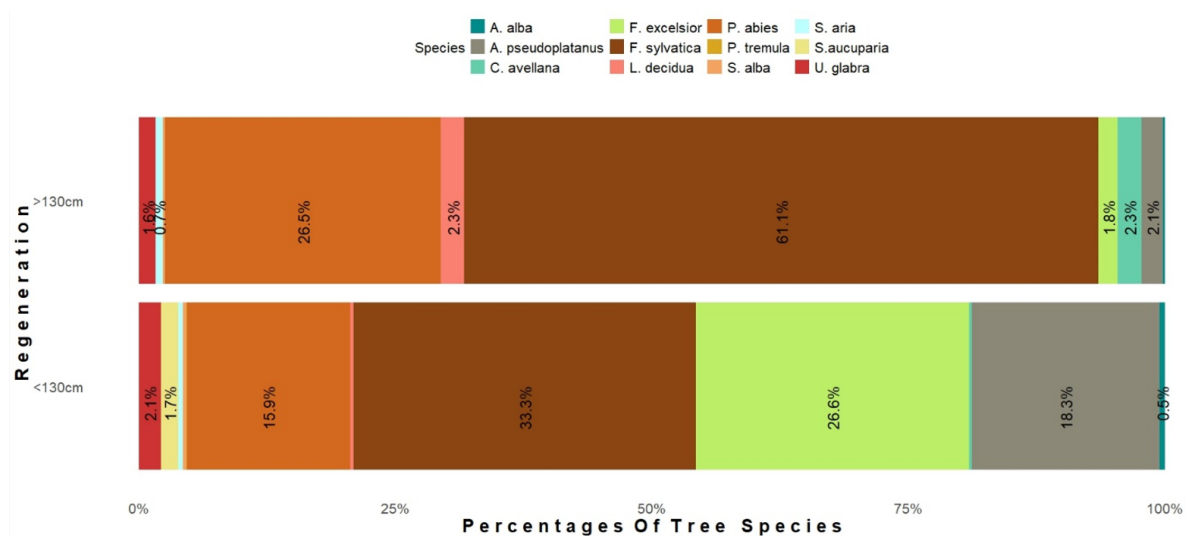
Ergebnisse und Diskussion

Baumverjüngung und Höhenverteilung

In den 26 untersuchten Beständen des Rindbachwaldes wurden insgesamt 2.649 Individuen erfasst. Davon wurden 2.212 Individuen (0-130 cm Höhe), darunter Jungbäume, kleine und große Jungbäume, erfasst. Sie repräsentieren die potenzielle Verjüngung und umfassen zwölf verschiedene Arten (Tabelle 25). Die am häufigsten vorkommenden Arten waren *F. sylvatica* mit 33,32 % der Gesamtmenge, gefolgt von *F. excelsior* mit 26,63 %, *A. pseudoplatanus* mit 18,31 % und *P. abies* mit 15,91 %. Diese vier Arten bilden zusammen die vorherrschende Baumverjüngungspopulation (0–130 cm Höhe) innerhalb des untersuchten Gebiets (Tabelle 27).

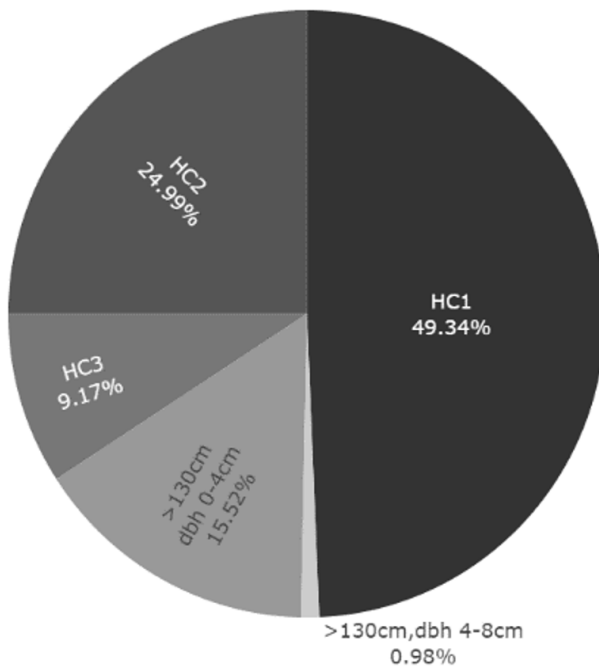
Eine separate Analyse wurde für Individuen mit einer Höhe von über 130 cm, aber einem BHD von weniger als 8 cm durchgeführt. Insgesamt wurden 437 Individuen aus zehn verschiedenen Arten gefunden. Die häufigsten Arten in dieser Höhenklasse waren *F. sylvatica* mit 61,10 % und *P. abies* mit 26,54 %. Diese beiden Arten allein machten einen Großteil der erfassten Jungbäume aus. (Abbildung 104).

Abbildung 104 Verteilung der Baumarten nach Regenerationshöhe: Das obere Feld zeigt die Verteilung der Baumarten, die höher als 130 cm sind, während das untere Feld die Arten darstellt, die niedriger als 130 cm sind. Die am häufigsten vorkommenden Arten in der Regenerationsphase (<130 cm) waren Buche (*F. sylvatica*), Esche (*F. excelsior*), Bergahorn (*A. pseudoplatanus*) und Fichte (*P. abies*), die zusammen diese Höhenklasse dominierten. Unter den jungen Bäumen mit einer Höhe von mehr als 130 cm waren Buche und Fichte die häufigsten Arten. Die Baumarten sind alphabetisch geordnet, und Arten, die weniger als 0,5 % der Gesamtverteilung ausmachen, sind in den Feldern nicht aufgeführt



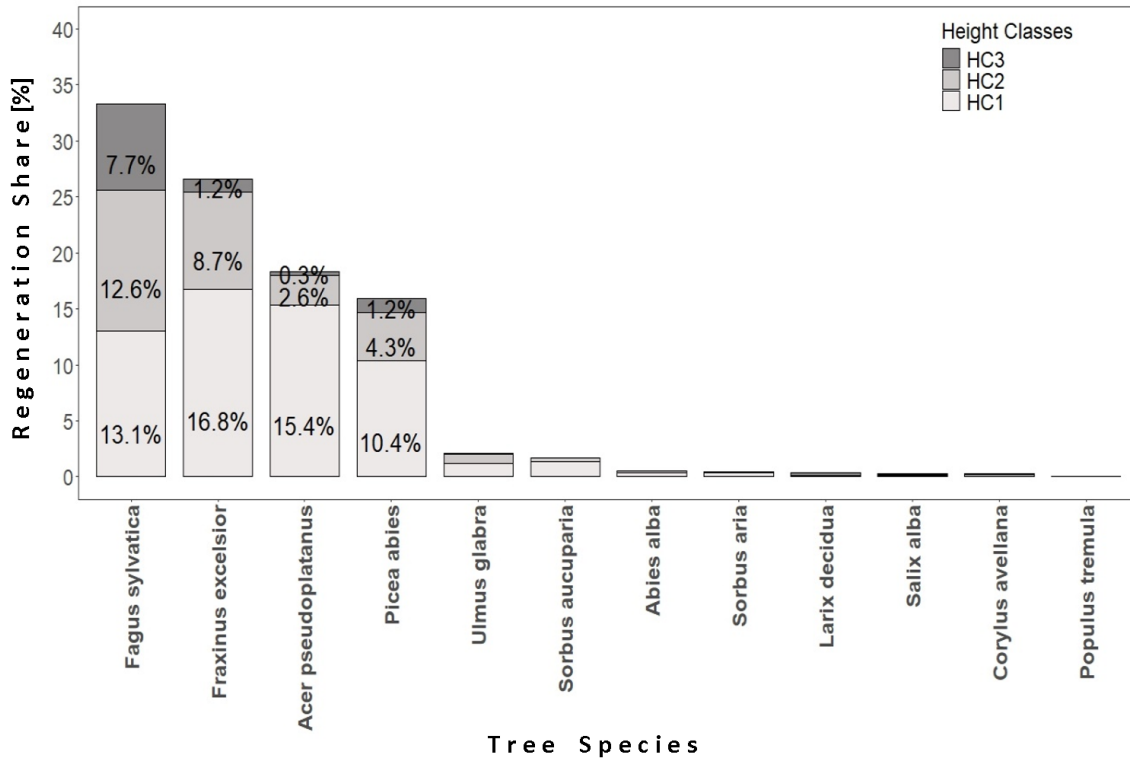
Bei einer umfassenderen Übersicht aller erfassten Exemplare ist die Mehrheit (fast 75 %) in den unteren Höhenklassen von 0–80 cm zu finden, was auf ein signifikantes Vorkommen von Keimlingen (49,34 %) und niedrigem Jungwuchs (24,99 %) hindeutet. Höherer Jungwuchs zwischen 81 und 130 cm machen einen kleineren Anteil (9,17 %) aus, während Exemplare über 130 cm mit BHD-Messungen von 0–8 cm auf junge Bäume hinweisen und in den 26 untersuchten Beständen etwa 16 % ausmachen (Abbildung 105).

Abbildung 105 Von insgesamt 2,649 registrierten Individuen fällt fast die Hälfte in die Höhenklasse von 0 bis 30 cm, wobei es sich um Keimlinge handelt. Etwa 25 % gehören zur zweiten Höhenklasse von 31 bis 80 cm, hauptsächlich niedrige Jungbäume. Knapp 10 % werden als 81–130 cm hohe Jungbäume eingestuft. Die übrigen Individuen sind größer als 130 cm, wobei etwa 15 % einen Brusthöhendurchmesser (BHD) zwischen 0 und 4 cm aufweisen, während die restlichen knapp 1 % einen BHD zwischen 4 und 8 cm aufweisen



Die Höhenklassenverteilung der Verjüngungen, insbesondere derjenigen von 0 bis 130 cm Höhe, zeigt ein Muster bei den vier dominanten Arten sowie den meisten übrigen Arten im Gebiet. Bemerkenswert ist, dass der Großteil der Verjüngung in die Höhenklasse 1 fällt, zu der die jüngsten und kleinsten Pflanzen, vor allem Keimlinge, gehören. Dieser Jungwuchs, die weniger als 130 cm groß sind, machen beachtliche 59 % der gesamten Verjüngung aus, was auf eine starke Anfangsphase dieser Arten hindeutet.

Abbildung 106 Anteil der Höhenklassen (HC1: 0–30 cm, HC2: 31–80 cm, HC3: 81–130 cm) an der Verjüngung (<130 cm Höhe) für Baumarten



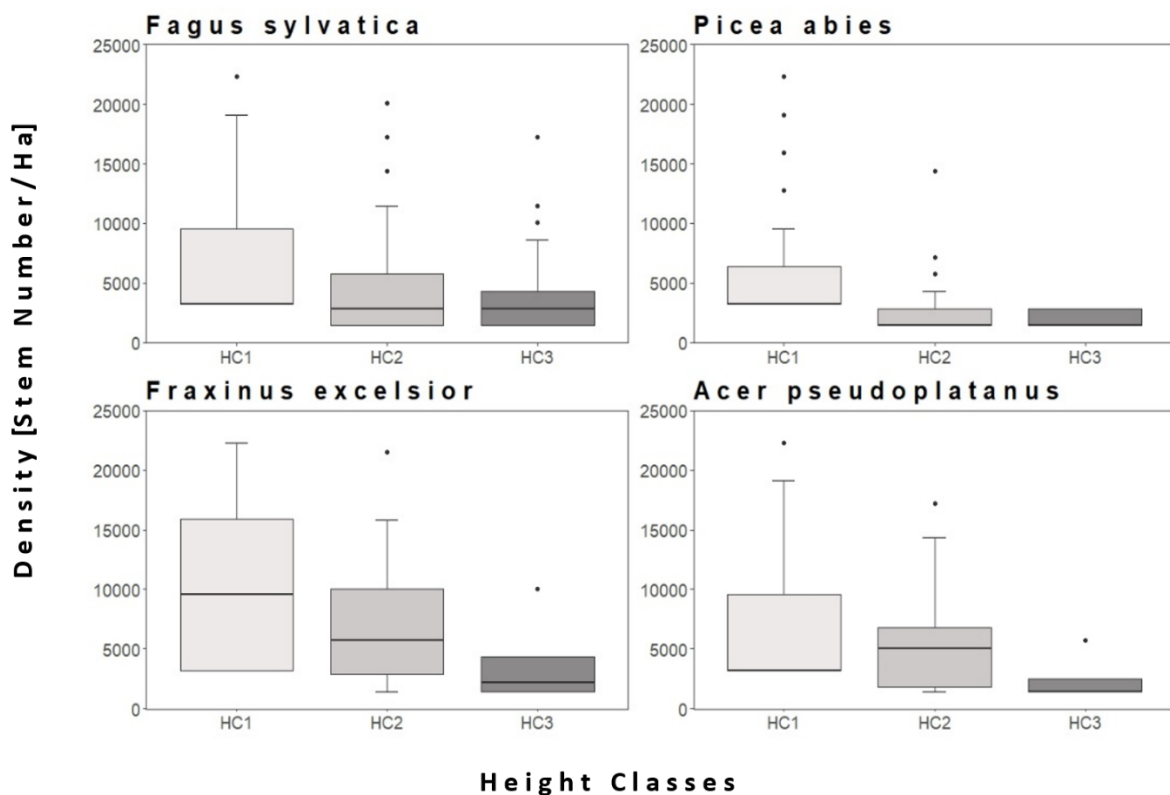
Anschließend umfasst die Höhenklasse 2, die aus niedrigen Jungbäumen besteht, fast 30 % der Verjüngung. Diese Keimlinge haben das Keimlingsstadium hinter sich gelassen und beginnen, sich fester im Ökosystem zu etablieren. Der verbleibende Teil der Verjüngung besteht aus höherem Jungwuchs (Tabelle 27; Abbildung 106). Diese Verteilung verdeutlicht die verschiedenen Wachstumsstadien innerhalb des sich regenerierenden Waldes, wobei jüngere Pflanzen deutlich überwiegen, die für die langfristige Nachhaltigkeit und Widerstandsfähigkeit des Waldökosystems von wesentlicher Bedeutung sind (Kuuluvainen und Aakala, 2011).

Die Verjüngungsdichte der vier dominanten Arten, ob Laub- oder Nadelbäume, zeigt ein klares Muster: Sie ist in der ersten Höhenklasse (0–30 cm) deutlich höher. Diese anfängliche Höhenklasse repräsentiert die jüngsten Verjüngungsbemühungen, bei denen aufgrund günstiger Bedingungen für Keimung und frühes Wachstum reichlich Keimlinge vorhanden sind. Die hohe Dichte in dieser Klasse unterstreicht die erfolgreiche Etablierung neuer Individuen bei diesen Arten.

Bei Laubbaumarten nimmt die Regenerationsdichte stark ab, wenn die Pflanzen in höhere Höhenklassen übergehen. Dieser Rückgang deutet darauf hin, dass sich zwar zunächst viele Keimlinge etablieren können, aber weniger überleben oder mit zunehmender Höhe im gleichen Tempo weiterwachsen. Wenn diese Pflanzen die dritte Höhenklasse (80–130 cm) erreichen, die für höherem Jungwuchs steht, ist die Dichte deutlich geringer, was auf die Herausforderungen für das Überleben und Wachstum über das Sämlingsstadium hinaus hinweist.

Im Gegensatz zeigt die Fichte (*Picea abies*) einen ähnlichen Trend abnehmender Verjüngungsdichte mit zunehmender Höhenklasse. Allerdings ist die Abnahme zwischen der ersten und zweiten Höhenklasse weniger ausgeprägt als bei den Laubbaumarten (Abbildung 107).

Abbildung 107 Verteilung der Verjüngungsdichte (< 130 cm Höhe) über die Höhenklassen (HC1: 0–30 cm, HC2: 31–80 cm, HC3: 81–130 cm) für die vier dominanten Arten



Einfluss der Lichtverfügbarkeit auf die Regeneration

Einfluss auf die Regenerationsdichte

Die Lichtverfügbarkeit an jeder Probefläche wurde mittels Hemisphärenfotografie gemessen, einer bewährten Methode zur Beurteilung der Waldstruktur und der Lichtmenge, die den Unterwuchs erreicht (Chen et al., 1991; Roxburgh, 1995). Standortfaktoren für vier dominante Arten (Buche, Fichte, Esche und Bergahorn) in der Verjüngung (<130 cm Höhe) geben laut HemiView-Handbuch den Strahlungsanteil an, der die Satellitenflächen erreicht. Sie reichen von 0 bis 1 Mole Photonen pro Quadratmeter und Jahr, wobei 0 keine Strahlung (vollständige Sicht auf den Himmel) und 1 die Strahlungsstärke für einen offenen Standort (vollständige Sicht auf den Himmel ohne Sichtbehinderung) bedeutet.

Der indirekte Standortfaktor (ISF) und der direkte Standortfaktor (DSF) sind wichtige Indikatoren für die Verfügbarkeit von Sonnenstrahlung, die die Regeneration von Baumarten in Waldökosystemen maßgeblich beeinflusst. Der ISF misst den Anteil der diffusen Sonnenstrahlung, der den Waldboden erreicht, während der DSF den Anteil der direkten Sonnenstrahlung misst (Anderson, 1964). In linearen Regressionsmodellen, die Regenerationsmuster von Individuen unter 130 cm Höhe untersuchen, liefern diese Faktoren wichtige Erkenntnisse.

Für Buche und Fichte erfolgt die Regression über einen weiten Bereich von ISF- und DSF-Werten von 0 bis 1 mol m⁻² yr⁻¹. Dieser Bereich zeigt, dass sich diese Arten unter unterschiedlichen Lichtbedingungen etablieren können, von sehr geringer bis zu relativ hoher Sonneneinstrahlung. Die Daten zeigen jedoch auch, dass die höchsten Regenerationsdichten und die größten Konzentrationen junger Pflanzen für diese Arten in einem engeren Bereich, insbesondere zwischen 0 und 0,2 mol m⁻² yr⁻¹, zu finden sind. Dies deutet darauf hin, dass Buchen und Fichten Keimlinge am besten in Umgebungen gedeihen, in denen sie nur wenig direktes Sonnenlicht erhalten. Sie sind eher auf diffuses Licht angewiesen, das oft unter einem geschlossenen Blätterdach oder im Schatten zu finden ist.

Im Gegensatz dazu ist die Regeneration von Esche und Bergahorn hauptsächlich in einem etwas breiteren Bereich der Sonneneinstrahlung zu beobachten, insbesondere zwischen 0 und 0,3 mol m⁻² yr⁻¹. Dies deutet darauf hin, dass diese Arten etwas mehr Licht vertragen, sowohl diffuses als auch etwas direktes Sonnenlicht, im Vergleich zu Buche und Fichte. Das größere Verbreitungsgebiet dieser Arten könnte auf ihre unterschiedlichen ökologischen

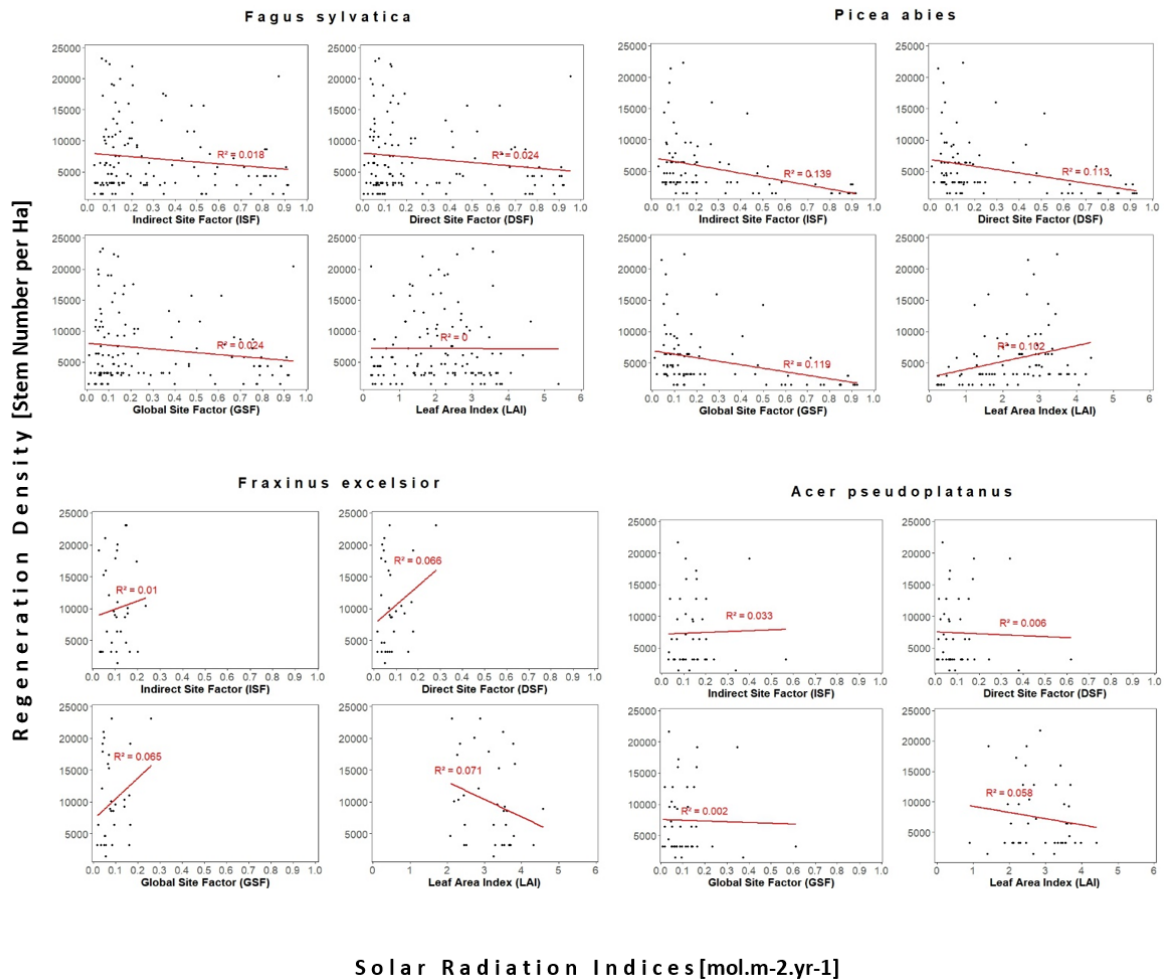
Strategien zurückzuführen sein, da sie in Umgebungen mit unterschiedlichen Lichtverhältnissen konkurrenzfähiger sind und häufig in Waldlücken oder an Waldrändern vorkommen, wo mehr Sonnenlicht eindringt (Niinemets und Valladares, 2006).

Der Global Site Factor (GSF), der den Anteil der Globalstrahlung (direktes und diffuses Licht) quantifiziert, der unter ein Pflanzendach gelangt, im Verhältnis zur verfügbaren Menge unter offenen Bedingungen, dient als wichtiges integratives Maß für die allgemeinen Strahlungsbedingungen in Waldgebieten. Durch die Berücksichtigung beider Komponenten der Sonnenstrahlung ermöglicht der GSF ein umfassenderes Verständnis der Lichtverhältnisse unter dem Blätterdach und erfasst die kombinierten Auswirkungen von Kronendachdicke und -struktur auf die Lichtverfügbarkeit. Bei der Untersuchung des GSF für alle vier dominanten Arten zeigt sich ein klares Muster: Die beim GSF beobachteten Trends stimmen im Allgemeinen mit denen des Indirect Site Factor (ISF) und des Direct Site Factor (DSF) überein.

Der Blattflächenindex (LAI), gemessen mittels hemisphärischer Fotografie in 130 cm Höhe, liefert eine quantitative Schätzung der gesamten Blattoberfläche pro Bodenfläche, die von ausgewachsenen Bäumen mit einer Höhe von über 130 cm bedeckt ist. Dieser Wert ist entscheidend für das Verständnis der Struktur und Dichte des Kronendachs. Ein höherer LAI weist auf ein dichteres Kronendach mit mehr Blattbedeckung hin, was wiederum zu einer geringeren Lichtdurchdringung des Unterholzes und des Waldbodens führt. Das dichte Laub fängt einen erheblichen Teil des einfallenden Lichts ab und absorbiert es, wodurch die Menge an direktem und diffusem Sonnenlicht, das die unteren Vegetationsschichten erreicht, verringert wird (Abbildung 108).

Trotz der detaillierten Analyse der Lichtverfügbarkeit durch ISF, DSF und GSF sowie der Kronendachdicke gemessen durch LAI zeigen die Regressionsmodelle für alle vier dominanten Arten keine starke Korrelation zwischen Lichtverfügbarkeit und Regenerationsdichte. Die Bestimmtheitsmaße in diesen linearen Regressionen lassen darauf schließen, dass die Variation der Lichtverhältnisse – ob direkt, diffus oder global – nur einen kleinen Teil der Variation der Regenerationsdichten erklärt. Dies weist darauf hin, dass andere ökologische oder Umweltfaktoren wie Bodenbedingungen, Konkurrenz oder mikroklimatische Einflüsse wahrscheinlich eine bedeutendere Rolle bei der Gestaltung der Regenerationsmuster in diesem Waldökosystem spielen.

Abbildung 108 Lineare Regressionsmodelle zur Veranschaulichung der Korrelation zwischen der Regenerationsdichte (<130 cm Höhe) und den Variablen der hemisphärischen Fotografie: Indirekter Standortfaktor (ISF), Direkter Standortfaktor (DSF), Globaler Standortfaktor (GSF) und Blattflächenindex (LAI)



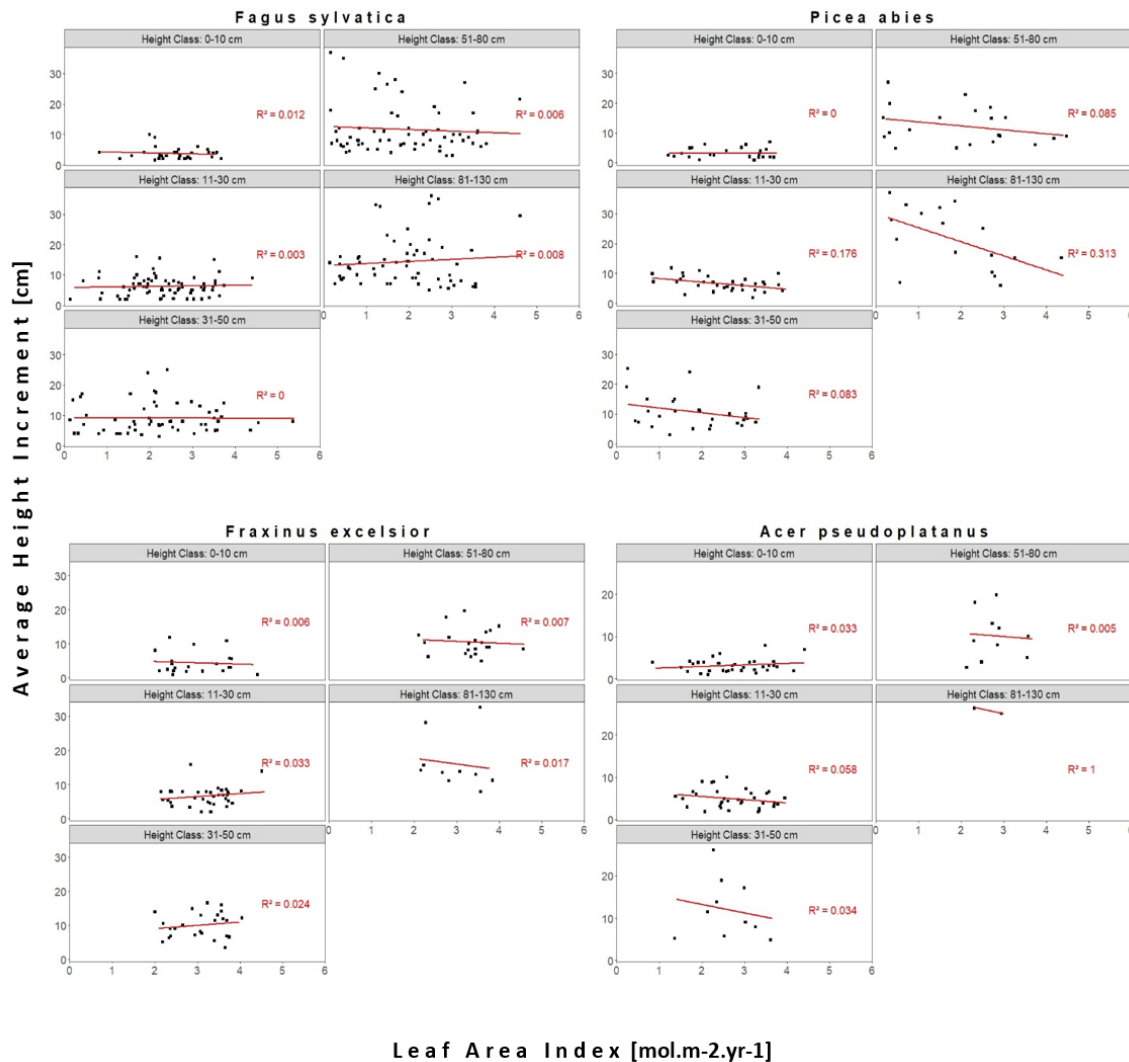
Einfluss von LAI auf den Höhenzuwachs der Regeneration

Um den Einfluss der Lichtverfügbarkeit auf die Etablierung und das anschließende Wachstum der Sämlinge zu beurteilen, wurde ein lineares Regressionsmodell verwendet, um die Beziehung zwischen LAI und durchschnittlichem Höhenzuwachs der letzten zwei Jahre über fünf Höhenklassen hinweg zu visualisieren. Obwohl einige Studien darauf hindeuten, dass die Etablierung der Keimlinge nicht signifikant durch erhöhtes Licht beeinflusst wird, sind Überleben und Wachstum der Keimlinge überwiegend lichtabhängig (Adili et al., 2013; Gailpeau et al., 1997; Storaunet und Rolstad, 2015). Die Ergebnisse dieser Analyse liefern je-

doch keine eindeutigen Hinweise auf eine signifikante Beziehung zwischen Lichtverfügbarkeit und Höhenzuwachs, da die Regressionsmodelle schwache Korrelationen zwischen LAI und durchschnittlichem Höhenzuwachs über alle Höhenklassen hinweg zeigen.

Für Fichte in der Höhenklasse von 80 bis 130 cm ist die Korrelation etwas stärker ausgeprägt, was darauf schließen lässt, dass die Lichtverfügbarkeit in diesem Stadium eine größere Rolle spielt. Eine mögliche Erklärung ist, dass sich Keimlinge unter 130 cm Höhe noch in einem sehr frühen Entwicklungsstadium befinden, in dem andere Faktoren einen stärkeren Einfluss auf das Wachstum haben könnten (Abbildung 109).

Abbildung 109 Bewertung des Zusammenhangs zwischen Lichtverfügbarkeit und Höhenwachstum in den letzten zwei Jahren bei vier vorherrschenden Arten. Pro Art wurden zwei gesunde, nicht abgefressene und kräftige Individuen jeder Höhenklasse ausgewählt, um das Höhenwachstum des Haupttriebs zu messen

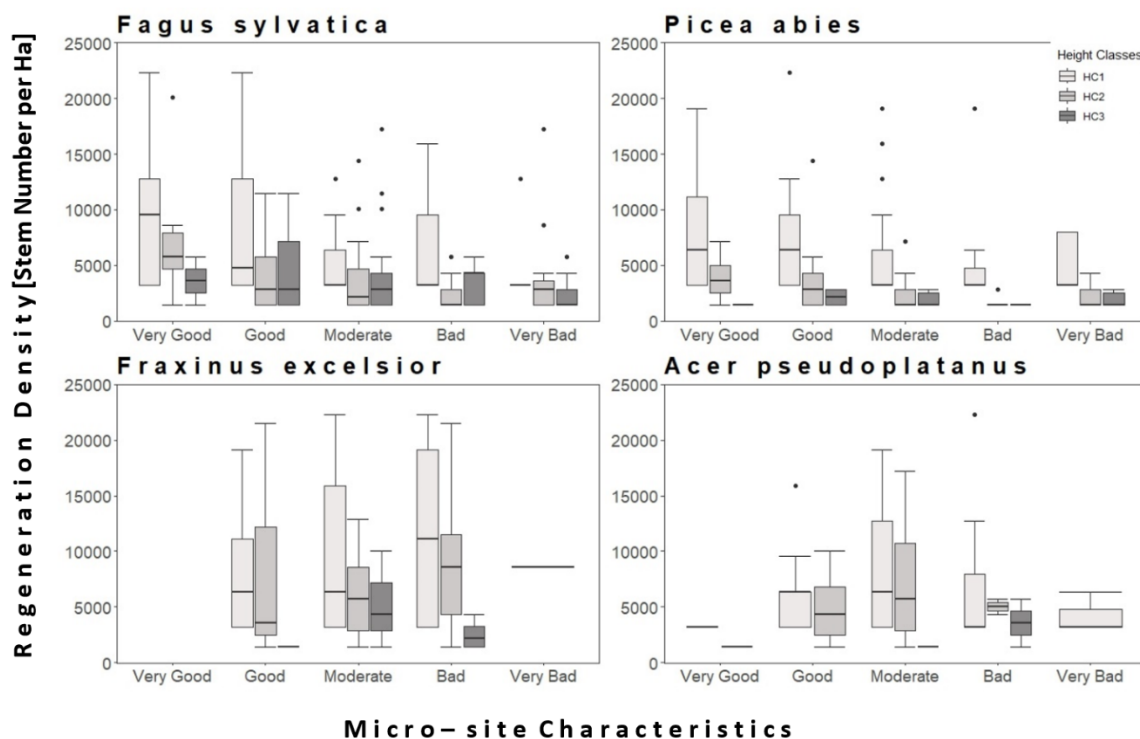


Einfluss der Mikrostandortqualitäten auf die Regeneration

Jede Satellitenfläche wurde systematisch in verschiedene Mikrostandortqualitätsklassen eingeteilt, die von "sehr gut" bis "sehr schlecht" für die Etablierung der Verjüngung reichten. Diese Kategorisierung erfolgte anhand einer detaillierten Bewertungsskala von 0 bis 10, die eine Vielzahl von Attributen berücksichtigte, die für jede Satellitenfläche spezifisch sind, wie in Tabelle 24. Diese Eigenschaften wurden bewertet, um ein umfassendes Verständnis der

Eignung des Standorts für die Förderung des Wachstums neuer Pflanzen zu erhalten. Höhere Punktzahlen weisen auf günstigere Bedingungen für die Ansiedlung und das Wachstum des Jungwuchses hin.

Abbildung 110 Regenerationsdichte über vier dominante Arten und verschiedene Mikrostandortqualitätsbereiche und Höhenklassen hinweg: HC1 (0–30 cm), HC2 (31–80 cm) und HC3 (81–130 cm)



Die gruppierten Balkendiagramme, illustriert die Verjüngungsdichte in drei verschiedenen Höhenklassen (0–30 cm, 30–80 cm und 80–130 cm) für die vier dominanten Arten und zeigen einen klaren Trend in Bezug auf diese Mikrostandort-Qualitätsbewertungen (Abbildung 110). Insbesondere die Regeneration innerhalb der Höhenklasse 1 (0 bis 30 cm) wies durchgängig die höchste Dichte über fast alle Bereiche der Mikrostandortqualität hinweg auf. Dies weist darauf hin, dass die Anfangsstadien der Regeneration, in denen die Keimlinge typischerweise weniger als 30 cm hoch sind, sich am erfolgreichsten über ein breites Spektrum von Mikrostandortbedingungen hinweg etablieren. Im Gegensatz dazu nimmt die Dichte der Pflanzen ab, wenn sie höher wachsen und in die zweite (30–80 cm) und dritte (80–130 cm) Höhenklasse übergehen, insbesondere auf Mikrostandorten geringerer Qualität.

Die Konzentration der Regeneration, die sich vom ersten bis zum dritten Quartil erstreckt, zeigt für Buche und Fichte ein deutliches Muster über alle Höhenklassen hinweg. Bei einem Übergang von sehr guten zu mäßigen Standortbedingungen nimmt die Verjüngungsdichte bei beiden Arten deutlich ab, was die abnehmende Eignung dieser Bedingungen für die Förderung des Jungwuchses widerspiegelt. Bei einem Übergang zu schlechten und sehr schlechten Standortbedingungen nimmt die Verjüngungsdichte jedoch wieder leicht zu.

Esche und Bergahorn folgen in ihren Regenerationsmustern hingegen nur unzureichend dem gleichen Muster. Beide Arten zeigen unter extrem guten und sehr schlechten Standortbedingungen eine sehr geringe oder gar keine Regeneration. Bezüglich Bergahorn ist die höchste Regenerationskonzentration unter gemäßigten Bedingungen bemerkenswert, was darauf hindeutet, dass es in Umgebungen gedeiht, in denen die Bedingungen weder zu günstig noch zu hart sind. Im Gegensatz dazu folgt die Esche einem anderen Muster, wobei die Regenerationsdichte von guten zu schlechten Bedingungen allmählich zunimmt.

Um ein tieferes Verständnis der Faktoren zu erlangen, die eine Regeneration auch unter ungünstigeren Standortbedingungen ermöglichen, wurde eine umfassende Untersuchung zur Lichtverfügbarkeit in diesen Gebieten durchgeführt. Die Ergebnisse, dargestellt durch Box-and-Whisker-Diagramme, zeigen einen klaren Zusammenhang zwischen Lichtverfügbarkeit und Standortqualität. Insbesondere Parzellen, die als für die Regenerationsetablierung ungünstig eingestuft wurden, weisen tendenziell eine höhere Lichtverfügbarkeit auf. Diese erhöhte Lichtdurchdringung des Unterholzes fördert das Wachstum von Gräsern und Kräutern, die unter diesen Bedingungen oft in größeren Mengen wachsen und größere Höhen erreichen.

Darüber hinaus zeigt die Analyse, dass der Blattflächenindex (LAI) für ausgewachsene Baumkronen (über 130 cm Höhe) tendenziell niedriger ist, wenn der indirekte Standortfaktor (ISF), der direkte Standortfaktor (DSF) und der globale Standortfaktor (GSF) erhöht sind. Dieser reduzierte LAI entspricht einer weniger dichten Baumkrone, wodurch mehr Sonnenlicht den Waldboden erreicht und die Regeneration der Unterholzvegetation (unter 130 cm Höhe) unterstützt wird (Abbildung 111).

Diese Trends werden noch deutlicher, wenn man die Parzellen mit Gras- und Kräuterbedeckung innerhalb der Satellitenparzellen untersucht. Mit zunehmender Gras- und Kräuterbedeckung (gemessen auf einer Skala von 0 bis 10) nimmt die Qualität der Mikrostandorte entsprechend ab. Insbesondere mit zunehmender Gräser- und Kräuterbedeckung werden

die Mikrostandorteigenschaften zunehmend schlechter bewertet, wobei diese Standorte oft eher in die Kategorien „schlecht“ oder „sehr schlecht“ eingestuft werden.

Weiters beeinflusst nicht nur der Anteil der Gras- und Kräuterbedeckung die Bewertung des Mikrostandorts, sondern auch die Höhe dieser Pflanzen. Wachsen Gräser und Kräuter auf einem Mikrostandort, sinkt die Gesamtbewertung des Standorts tendenziell noch weiter. Dieser Qualitätsverlust des Mikrostandorts spiegelt sich in einer schlechteren Gesamtbewertung wider, da höhere Vegetation die Ansiedlung von Baumkeimlingen hemmen kann, indem sie ihnen Licht wegnimmt. Der kombinierte Effekt der erhöhten Bedeckung und Höhe von Gras und Kräutern trägt zu einer deutlich verringerten Eignung des Standorts für die Regeneration bei (Abbildung 112).

Abbildung 111 Lichtverfügbarkeit und Mikrolagebedingungen für die Regenerationsetablierung. Schlechter bewertete Parzellen weisen eine höhere Lichtverfügbarkeit auf, was zu höheren ISF-, DSF- und GSF-Werten führt. Dies entspricht einem geringeren LAI für ausgewachsene Baumkronen, wodurch mehr Licht den Unterwuchs erreichen kann

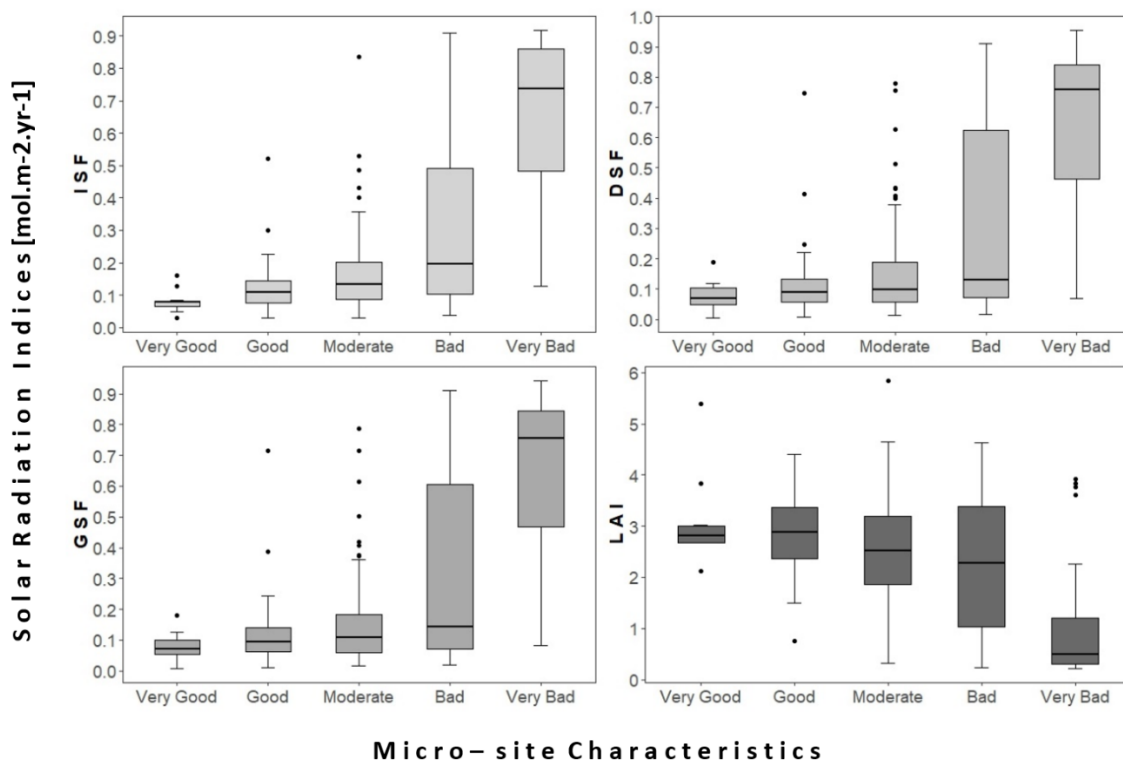
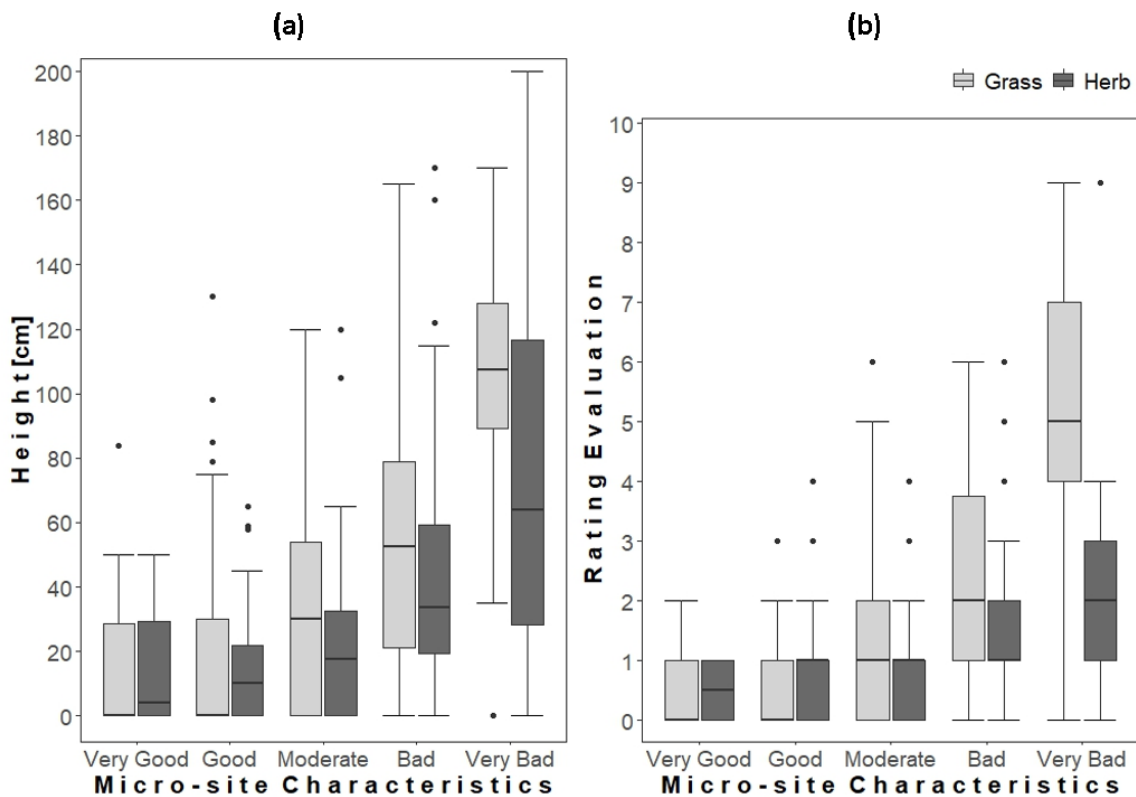


Abbildung 112 Zusammenhang zwischen Gras- und Kräuterhöhe (a) und Bedeckungsgrad (0 bis 10) (b) und Bewertung der Mikrostandortmerkmale. Mit zunehmendem Anteil und zunehmender Höhe von Gras und Kräutern tendieren die Bewertungen der Mikrostandortmerkmale in Richtung „schlecht“ und „sehr schlecht“

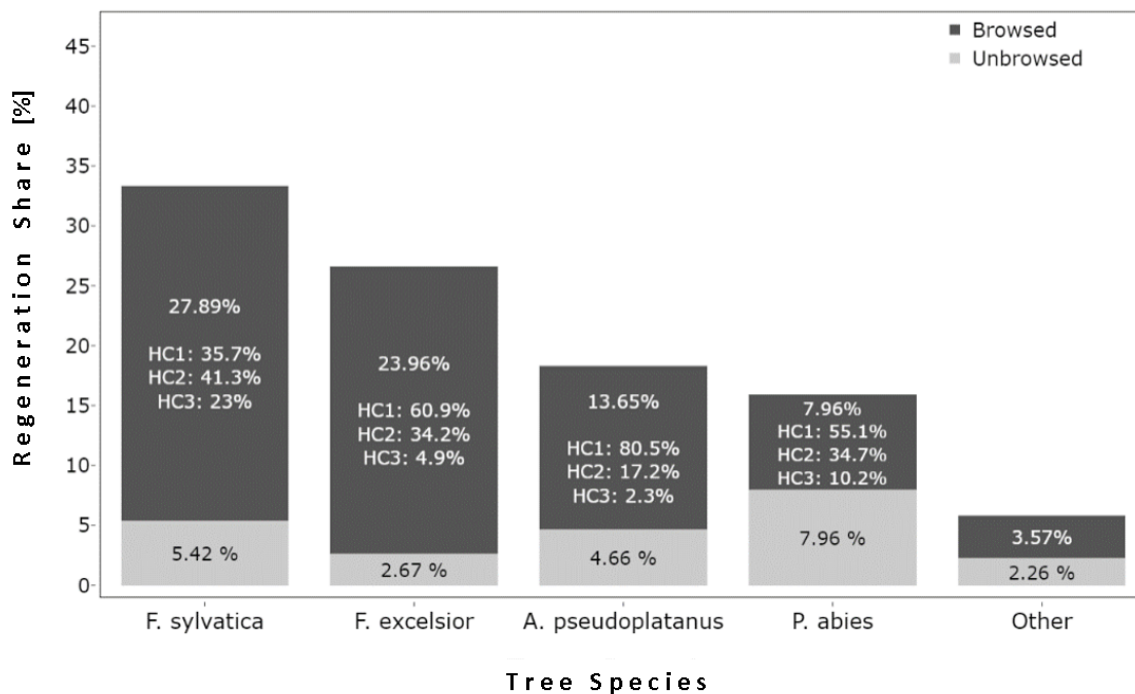


Einfluss von Wild auf die Regeneration

Verbissanteile von Baumarten unterschiedlicher Höhenklassen

Von insgesamt 2212 Individuen (<130 cm Höhe), die in 26 Beständen erfasst wurden, zeigten 1704 Individuen (77,03 %) Anzeichen von Verbiss durch Herbivoren, wovon 0,9 % Anzeichen von frisch erfolgtem Verbiss aufwiesen. Die restlichen 22,97 % zeigten keine Anzeichen von Verbiss. (Tabelle 25). Unter den vier dominanten Arten waren die Fichte und Buche am stärksten verbissen, Unter den vier dominanten Baumarten wurden die Esche und die Buche am stärksten verbissen, gefolgt vom Bergahorn. Die am wenigsten verbissene Art unter diesen war die Fichte, bei der 50 % der Individuen Anzeichen von Verbiss zeigten. Bei den übrigen acht Baumarten, die zusammen fast 6 % der Gesamtzahl ausmachten, wiesen mehr als die Hälfte Anzeichen von Verbiss auf. (Abbildung 113).

Abbildung 113 Verbissanteile für vier dominante Arten in der Verjüngung (<130 cm Höhe). Die verschiedenen Höhenklassen innerhalb der Verbissabschnitte stellen den Anteil des Verbisses für jede Höhenklasse dar. HC1 bezieht sich auf Keimlinge (0–30 cm Höhe), HC2 steht für kurze Jungbäume (31–80 cm Höhe) und HC3 bezeichnet hohe Jungbäume (81–130 cm Höhe).



Unter den verschiedenen Höhenklassen aller Baumarten wurde Jungwuchs (0 bis 30 cm Höhe) am stärksten verbissen, was auf ihre höhere Dichte und bessere Zugänglichkeit für Verbiss zurückzuführen ist. In dieser Kategorie wies der Bergahorn mit 80 % die höchste Verbissrate auf. Bei der Buche hingegen wurde der höchste Verbissanteil in der zweiten Höhenklasse (31–80 cm) festgestellt, wo 41,3 % des Verbisses auftraten. Darüber hinaus hat Buche in der dritten Höhenklasse (80–130 cm) mit 23 % die höchste Verbissrate im Vergleich zu den anderen Baumarten.

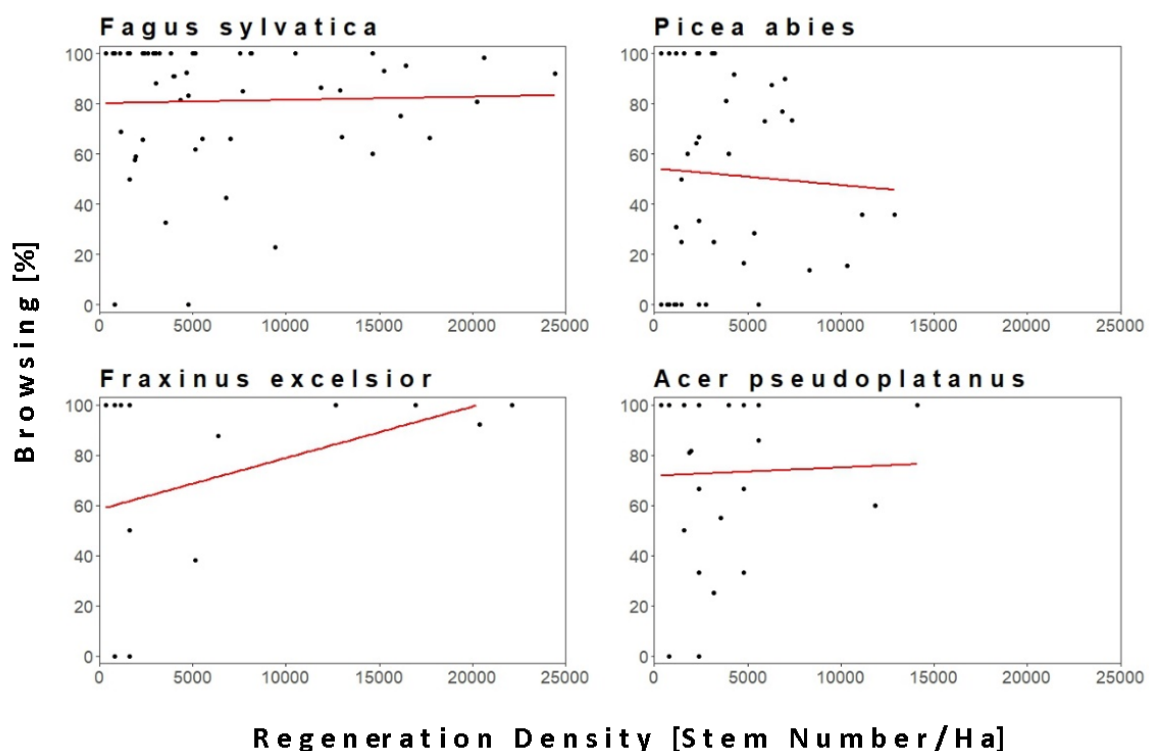
Insgesamt, unter Berücksichtigung aller Größenklassen, war die am stärksten verbissene Baumart die Esche, bei der 89,98 % der Verjüngung verbissen wurden. An zweiter Stelle stand die Buche mit 83,72 %, gefolgt vom Bergahorn mit 74,57 %. Die Fichte war die am wenigsten verbissene Art, wobei nur 50 % ihrer Verjüngung Anzeichen von Verbiss zeigten. (Esche > Buche > Bergahorn > Fichte).

Von insgesamt 437 Jungbäumen (Höhe >130 cm und Brusthöhendurchmesser (BHD) <8 cm) fallen 411 Bäume (94 %) in die BHD-Kategorie von 0 bis 4 cm. Unter diesen sind 66 % beschädigt, wobei 94 % der beschädigten Bäume Verbiss aufweisen und 6 % Anzeichen von Schälern durch Verbiss zeigen. Die restlichen 34 % in dieser Kategorie sind unbeschädigt. Die übrigen 6 % der Bäume haben einen BHD zwischen 4 und 8 cm. In dieser Gruppe sind 69 % beschädigt (davon 89 % mit Verbiss und 11 % mit Schälerschäden), während 31 % unversehrt bleiben (Tabelle 27).

Einfluss der Artenvielfalt auf den Verbiss

In insgesamt 77 festen Kreisflächen für Verjüngungen unter 130 cm Höhe war keine Art vollständig immun gegen Verbissschäden. Aufgrund der geringen Verfügbarkeit weniger dominanter Arten in diesen Flächen liegt der Fokus primär auf vier dominanten Arten. Unabhängig von ihrer Höhenklasse waren diese vier dominanten Arten einem erheblichen Verbisssdruck ausgesetzt (Abbildung 114).

Abbildung 114 Beziehung zwischen Verbisssanteilen und Verjüngungsdichte (<130 cm Höhe) für vier dominante Arten, basierend auf festen kreisförmigen Parzellen. Für jede Art werden feste kreisförmige Parzellen ohne Verjüngung aus der Analyse ausgeschlossen



Lineare Regressionsanalysen haben eine positive Beziehung zwischen der Häufigkeit von Buche und der Anzahl verbissener Verjüngungen dieser Art aufgezeigt. Konkret zeigt sich, dass die meisten Verjüngungsdichten von Buche im Bereich von 0 bis 5.000 Stämmen pro Hektar liegen und die Verbissintensität stark variieren kann, von 0 % bis 100 %. Es gibt jedoch eine deutliche Verschiebung des Verbissdrucks bei höheren Dichten. Überschreitet die Verjüngungsdichte von Buche 10.000 Stämme pro Hektar, liegt der Verbissdruck konstant über 60 %. Dieser Anstieg des Verbissdrucks bei höheren Dichten wird hauptsächlich auf die verringerte Verfügbarkeit alternativer Futterpflanzen zurückgeführt. In dicht besiedelten Beständen von Buche führt das begrenzte Vorkommen anderer schmackhafter Pflanzenarten dazu, dass ein größerer Anteil des Verbissdrucks auf Buche selbst gerichtet ist.

Im Gegensatz dazu hilft in Szenarien mit geringerer Verjüngungsdichte von Buche die Häufigkeit alternativer, schmackhafter Pflanzenarten, den Verbissdruck zu verteilen. Das Vorhandensein dieser anderen Arten bietet den Herbivoren alternative Nahrungsquellen, wodurch der Verbiss an Buche verringert wird.

Esche und Bergahorn zeigen ein ähnliches Muster in Bezug auf verbissene Verjüngungen. Obwohl Esche die zweitdominanteste Art ist und 26,63 % aller Verjüngungen ausmacht, ist ihre Verbreitung im Vergleich zu Buche deutlich lokalisierter. Während Buche über die Untersuchungsflächen hinweg weit verbreitet ist, tritt Esche eher in spezifischen, konzentrierten Bereichen auf.

Fichte, die einzige Nadelbaumart unter den vier dominanten Arten, zeigt ein deutlich anderes Muster im Vergleich zu den anderen. Im Gegensatz zu Buche, Esche und Bergahorn, die alle eine positive Korrelation zwischen Verjüngungsdichte und Verbissdruck aufweisen, zeigt Fichte eine negative Beziehung. Konkret nimmt der Verbissdruck auf Fichte ab, wenn die Dichte der Stämme pro Hektar zunimmt. Diese umgekehrte Beziehung deutet darauf hin, dass höhere Dichten von Fichte den Verbissdruck verringern könnten, möglicherweise aufgrund von Faktoren wie ihrer geringeren Schmackhaftigkeit oder den physikalischen Eigenschaften des Nadelbaumlaubs, das für Herbivoren weniger attraktiv oder zugänglich sein könnte (Fornara und Tilman, 2008).

Einfluss der Artenzusammensetzung auf den Verbiss

Die Artenzusammensetzung spielt eine entscheidende Rolle bei der Bestimmung des Verbissdrucks innerhalb eines Ökosystems. In Gebieten, die von hoch schmackhaften Arten do-

miniert werden, neigen Herbivoren dazu, ihre Verbissaktivitäten auf diese Pflanzen zu konzentrieren. Dies führt zu einem erhöhten Druck und kann möglicherweise die Regeneration dieser Arten hemmen (Gill, 1992). Eine hohe Artenvielfalt kann dazu beitragen, den Verbissdruck gleichmäßiger auf die Gemeinschaft zu verteilen und so die Auswirkungen auf einzelne Arten zu verringern. Im Gegensatz dazu kann eine geringe Vielfalt zu einem intensiven Verbiss der wenigen verfügbaren Arten führen (Rooney und Waller, 2003).

Wenn jedoch die Dichte der Hirschpopulation hoch ist, steigt der Verbissdruck auf alle verfügbaren Baumarten signifikant an. Dies liegt daran, dass die Hirsche aufgrund ihrer größeren Population mehr Vegetation konsumieren müssen, was zu einem intensiveren Verbiss bei verschiedenen Arten führt. In solchen Szenarien reicht selbst das Vorhandensein einer Vielzahl von Laubbaumarten möglicherweise nicht aus, um den Druck auf einzelne Arten zu verringern (Côté et al., 2007).

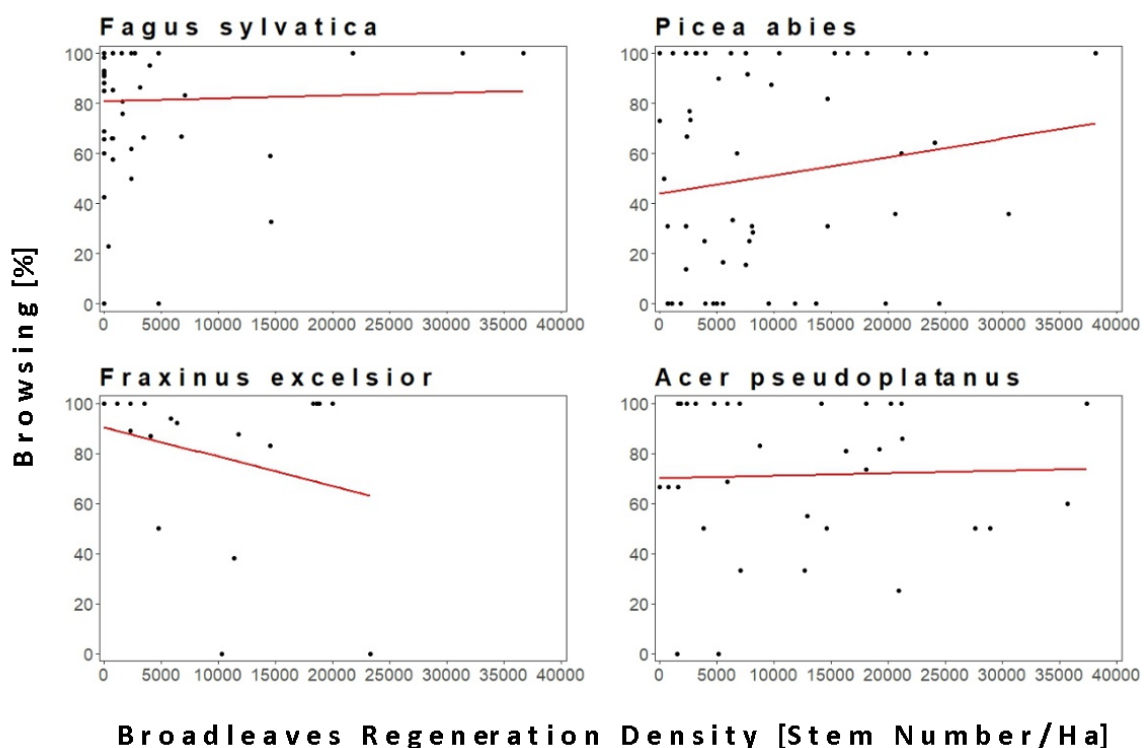
Die Zusammensetzung der Arten in einem Gebiet beeinflusst somit direkt die Intensität und Verteilung des Verbissdrucks und prägt die Regenerationsdynamik sowie die langfristige Struktur des Ökosystems. Um zu untersuchen, wie die Artenzusammensetzung den Verbissdruck in Rindbach beeinflusst, wurden lineare Regressionsanalysen durchgeführt. Ziel war es, den Einfluss der Verfügbarkeit von Laubbaumverjüngung auf den Verbissdruck zu analysieren, den die Verjüngung jeder der vier dominanten Arten individuell erfährt (Abbildung 115).

Bei der Untersuchung der Verjüngung von Buche, Bergahorn und Fichte wurde festgestellt, dass alle drei Arten bei einer höheren Dichte an Laubbaumverjüngung einen leicht erhöhten Verbissdruck erfuhren. Dies ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass eine höhere Gesamtdichte an Laubbaumarten mehr Wildtiere in das Gebiet anzieht, was den Verbissdruck auf alle verfügbare Vegetation, einschließlich Fichte erhöht.

Interessanterweise wurde in einer vorherigen Abbildung (Abbildung 114) gezeigt, dass bei einer Zunahme der Dichte von Fichte der Verbissdruck auf diese Art tatsächlich abnahm. Dies zeigt, dass Fichte für Wildtiere nicht besonders schmackhaft ist und sie diese Art weniger gezielt anvisieren, wenn andere Nahrungsquellen reichlich vorhanden sind. Der beobachtete Anstieg des Verbissdrucks auf Fichte in Gebieten mit hoher Laubbaumdichte ist daher nicht auf die Attraktivität von Fichte selbst zurückzuführen, sondern auf das Vorhandensein anderer, schmackhafterer Laubbaumarten.

Im Gegensatz dazu zeigte Esche ein anderes Muster: Der Verbissdruck auf diese Art nahm tatsächlich ab, wenn die Dichte der Laubbaumverjüngung zunahm. Obwohl Esche mit 89 % (Tabelle 27) den höchsten Gesamtverbissanteil in der Verjüngung aufweist, wird diese Art für Wildtiere weniger schmackhaft oder attraktiv, wenn andere Laubbaumarten verfügbar sind. Dies zeigt, dass Wildtiere bei Vorhandensein bevorzugter Nahrungsquellen ihren Verbiss von Esche auf diese anderen, attraktiveren Arten verlagern.

Abbildung 115 Zusammenhang zwischen Verbissintensität und Verjüngungsdichte von Laubbaumarten (Höhe < 130 cm) für vier dominante Arten, basierend auf festen kreisförmigen Parzellen. Wenn es sich bei einer Art um eine Laubbaumart handelt, wird sie aus den Berechnungen der Laubbaum-Verjüngungsdichte ausgeschlossen (z. B. wird für Buche die Verjüngungsdichte der Laubbaumarten als Gesamtdichte minus der Dichte von Buche selbst berechnet)



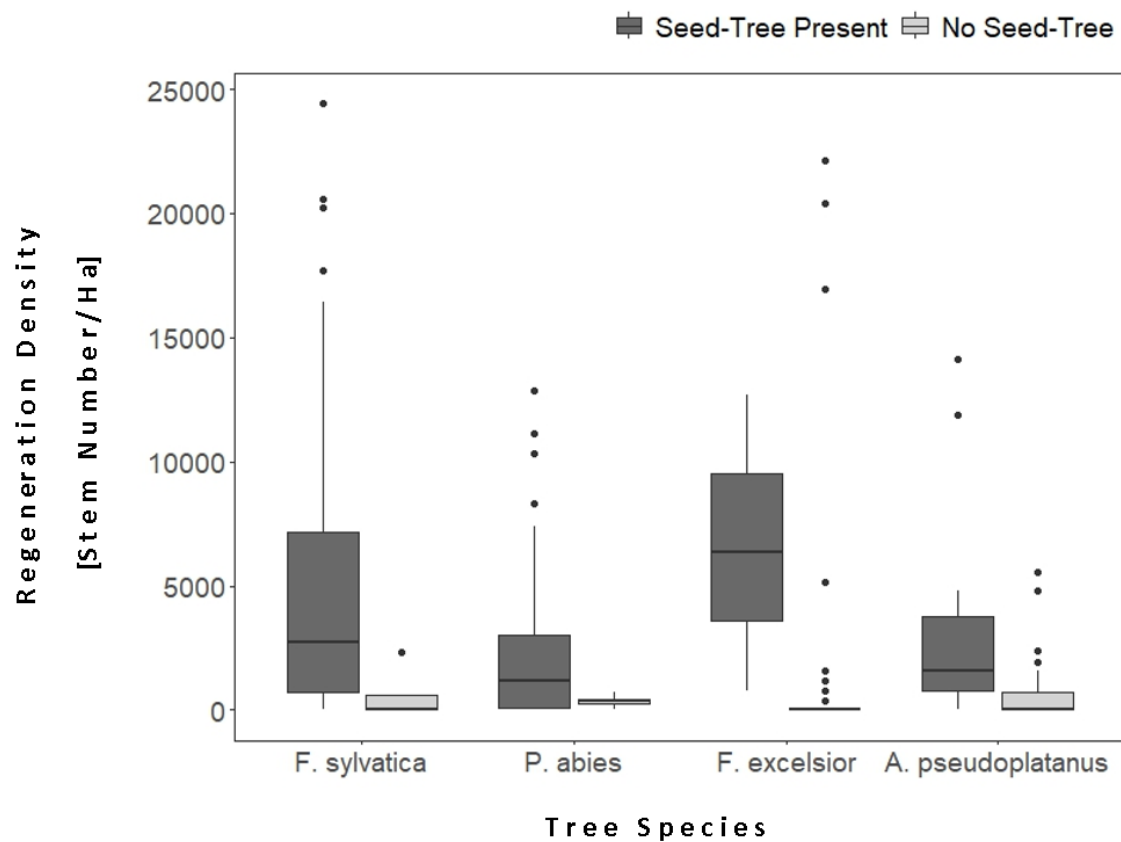
Darüber hinaus ist es wichtig anzuerkennen, dass Wildtiere bestimmte Pflanzenarten anderen vorziehen, was zu einem selektiven Verbiss von Baumarten führt (Boulanger et al., 2009; Kupferschmid, 2018). Allerdings spielen auch andere Faktoren, wie die Bodenvegetation und Bewirtschaftungspraktiken, eine bedeutende Rolle bei der Beeinflussung des Verbissverhaltens von Wildtieren (Ewald et al., 2014; Möst et al., 2015).

Einfluss von Samenbäumen auf die Verjüngung

Die Samenproduktion spielt eine wichtige Rolle bei der Beeinflussung der Baumverjüngung, der Waldstruktur und der Sukzessionsdynamik in natürlichen Ökosystemen (Galipeau et al., 1997; Viglas et al., 2013). Natürliche Verjüngung erfolgt hauptsächlich durch Samenausbreitung, bei der Samen entweder durch den Wind in nahegelegene offene Lücken transportiert oder direkt unter dem Mutterbaum abgeworfen werden (Kozlowski und Pallardy, 2002).

Um den Einfluss von Samenbäumen auf die Verjüngungsdichte zu bewerten, wurde eine Untersuchung in einem Radius von 30 Metern um jeden Gitterpunkt durchgeführt. Dabei wurden für jede Baumart die Individuen identifiziert, die zur Fruktifikation fähig sind (Abbildung 100). Die Ergebnisse bestätigten, dass in Gebieten mit Samenbäumen die Verjüngungsdichten derselben Art signifikant höher waren als an Standorten, an denen solche Bäume fehlten (Abbildung 116).

Abbildung 116 Positiver Einfluss von Samenbäumen auf die Verjüngungsdichte. Die Daten wurden an Gitterpunkten innerhalb eines 30-Meter-Radius erhoben, wobei alle Arten von Samenbäumen identifiziert und ihr Einfluss auf die Verjüngung bewertet wurde



AP 7.1: Naturgefahrenprozesse (Lawine)

Marc Adams, Andrew Giunta, Tadeja Pepelnjak, Frank Perzl, Matthias Plörer, Michaela Teich

Schwerpunkte in diesem Arbeitspaket sind die Modellierung der aktuellen bzw. potenziellen Lawinensituation (Anbruchgebiete [PRAs], Akkumulationslagen, Lawinenzüge und -schneisen), die Identifizierung von (kritischen) Flächen mit erhöhter Suszeptibilität für das Auftreten von Lawinenprozessen sowie die Erarbeitung einer standardisierten Methode für die Erhebung des Waldzustands im Rahmen der Naturgefahrenereignisdokumentation bei Naturgefahren welche zur Erhebung schutzwirkungsrelevanter Merkmale auf terrestrischen Stichproben dient.

Dafür erfolgt eine Literaturrecherche zum aktuellen Stand der Methoden zur Erhebung von schutzwirkungsrelevanten Merkmalen auf der Basis verschiedener Fernerkundungsdaten und Auswertungsmethoden. Unterstützt wird die Zustandsdatenerhebung durch Befliegung eines mit dem (verdichteten) terrestrischen Stichprobennetz erfassten Hangabschnitts von ca. 130 ha mit einem Uncrewed Aerial System (UAS), um LiDAR-Punktwolken und Orthophotos zu generieren. Ziel des Arbeitspaketes ist eine Validierung auf Hang-Ebene mit Grundraster- und Verdichtungsstichproben und Vergleich mit ÖBf-Forsteinrichtungsdaten. Der Fokus liegt dabei auf Merkmalen, die direkt aus Fernerkundungsdaten erhoben werden können, oder terrestrische Erfassungen bzw. Regionalisierungsmethoden erfordern.

Nachfolgend werden zuerst die Aktivitäten zu Terrestrische Stichprobenaufnahmen und luftgestützte Fernerkundung im Schutzwald beschrieben (Teil 1). Anschließend die Aktivitäten zur Erhebung historischer Lawinendaten, Identifizierung von Flächen mit erhöhter Suszeptibilität und Kartierung / Modellierung der aktuellen / potenziellen Lawinensituation (Teil 2).

Methoden TEIL 1: Terrestrische Stichprobenaufnahmen im Schutzwald

Design einer standardisierten Methodik für die terrestrische Stichprobenaufnahme

Zur Beurteilung der Schutzfunktion von Wäldern und zur Validierung von Schutzwald-Modellierungsergebnissen sind präzise Informationen über den Zustand der Waldbestände sowie verlässliche Eingangsdaten unerlässlich. Schutzwälder befinden sich jedoch häufig in steilen Gebirgsregionen, die anfällig für Naturgefahren wie Steinschlag, Rutschungen und Murgänge sind. Diese anspruchsvollen Bedingungen machen terrestrische Erhebungen über größere Flächen zeitaufwändig, schwierig und kostenintensiv. Der Einsatz von Laserscan-Daten (engl. *Light Detection and Ranging – LiDAR*) und Orthofotos hat sich als hilfreiches Instrument zur Beurteilung des Waldzustands etabliert. Zudem ermöglicht er eine Reduktion der notwendigen Stichprobendichte bei Waldbewertungen (Fernandez-de-Villan-San-Juan und Domingo-Santos, 2018; Pearse et al., 2018; Dash et al., 2015).

Ziel dieses Arbeitspakets war die Entwicklung einer standardisierten Methodik zur Ableitung von schutzwaldrelevanten Attributdaten in lawinengefährdeten Waldgebieten auf Basis von LiDAR- und Orthofotodaten. Außerdem wurde die Genauigkeit dieser Daten durch den Vergleich mit terrestrischen Waldaufnahmen und lokalen Forstinventurdaten validiert.

Für die terrestrischen Waldaufnahmen bzw. Referenzstichproben zur Erhebung der Waldstruktur wurde ein standardisierter Aufnahmeschlüssel entwickelt. Dieser basiert im Wesentlichen auf der Verfahrensbeschreibung „Erhebung terrestrischer Kontrolle und Referenzstichproben der Waldstruktur zur Ableitung der Größe von Vegetationsparametern hydrologischer Modelle“ (V2-1, 2018-08-17, Perzl et al., 2018), die im Rahmen des Interreg-Projektes ITAT4041-BLÖSSEN erstellt wurde (Markart et al., 2020). Die Kontroll- und Referenzstichproben dienen dazu, die erhobenen Fernerkundungsdaten punktuell zu validieren. Für den vorliegenden Zweck wurde der Aufnahmeschlüssel auf die wesentlichen, schutzwirksungsrelevanten Merkmale reduziert und entsprechend modifiziert (Perzl et al., 2023).

Der standardisierte Aufnahmeschlüssel enthält für die forstlichen Erhebungen im MEZG Rindbach folgende Größen, Parameter und qualitative Merkmale bzw. erfordert im Wesentlichen die Durchführung folgender Tätigkeiten:

- Ortung der vorkartierten Stichprobenpunkte mittels GNSS-Geräts, die in die flächendeckende Stichprobeninventur der ÖBf (400×400 m) eingehängt und auf 100×100 m verdichtet wurden
- Vermarkung der Stichprobenpunkte mit Vermarkungsrohren sowie Einmessung (GNSS) der tatsächlichen Stichprobenzentren
- Anlegen von Versicherungspunkten bzw. Sperrmaßen zur Unterstützung der Wiederauffindbarkeit der Stichprobenzentren
- Qualitative Beschreibung des Bestandstyps inklusive Fotodokumentation
- Linienstichprobe (LIS): Anlegen von vier rechtwinklig zueinanderstehenden, 7 m langen Linien (hangparallel sowie in Falllinie) zur Ermittlung der Bodenbedeckung und des Totholzes
- Quadrant Sample Plot (QSP): Anlegen eines 5×5 m großen Quadranten um das Stichprobenzentrum zur Erfassung von Sträuchern und Jungwuchs mit BHD < 10 cm und Höhe > 1,30 m
- Rectangle Sample Plot (RSP): Anlegen von zwei 2,5×1,0 m großen Rechtecken innerhalb des Quadranten zur Erfassung von Jungpflanzen mit einer Höhe von 0,1 bis 1,3 m (inklusive Erfassung von Wildeinflüssen wie Verbiss, Verfegen und Einzelschutz)
- Beurteilung des Standortes hinsichtlich Lichtdefiziten, Aufforstung, biotischen Störungen und Schneeschäden (z.B. Schneegleiten)
- Aufnahme von Stöcken mit einem Durchmesser ab 10 cm
- Erfassung von Bäumen (lebend und tot) mit BHD > 10 cm mittels Winkelzählproben mit Zählfaktor 4 (WZP4) und Stichprobenkreis mit Radius 7 m (CSP7)

Für die zu berücksichtigenden Bäume erfolgt die Aufnahme folgender Merkmale:

- Baumart
- Horizontaldistanz zum Stichprobenzentrum
- Azimut vom Stichprobenzentrum
- Brusthöhendurchmesser (BHD)
- Status: Baumzustand von lebend (ungezwieselt) bis tot / zersetzt
- Stammschäden (z.B. Steinschlag, Bringungsschäden, Schälwunden, sonstige)
- Bestimmung der Grundflächenzentralstämme sowie der zweitschwächsten und zweitstärksten Exemplare pro Baumart
- Ermittlung der Gesamthöhen bzw. Kronenansatzhöhen dieser Stämme
- GNSS-Einmessung der Grundflächenzentralstämme und weiterer relevanter Stämme
- Vermerk besonderer Vorkommnisse, Verhältnisse und allgemeiner Beobachtungen

Flächenauswahl

Im Vorfeld der terrestrischen Aufnahmen wurde ein geeignetes Teileinzugsgebiet innerhalb des gesamten MEZG-Rindbach definiert. Dabei galt es, eine zusammenhängende Fläche zu identifizieren, die zum einen ein ausreichendes Maß bzw. Potenzial für (Wald-)Lawinen und weitere Naturgefahrenprozesse aufweist und zum anderen ein Mindestmaß an Arbeitssicherheit hinsichtlich der Hangneigung gewährleistet. In einem ersten Schritt wurden sechs mögliche Teileinzugsgebiete festgelegt (Abbildung 117).

Abbildung 117 Vorauswahl von sechs potenziellen Einzugsgebieten für die terrestrische Stichprobenaufnahme



Als tatsächlich zu beprobendes Gebiet wurde eine Kombination der Teileinzugsgebiete 1 und 1.4 (Abbildung 118) mit einer Fläche von rund 120 ha ausgewählt (Abbildung 119).

Abbildung 118 Luftbildaufnahme des gesamten MEZG-Rindbach mit dem für die forstlichen Geländeaufnahmen erweiterten Teileinzugsgebiet 1.4

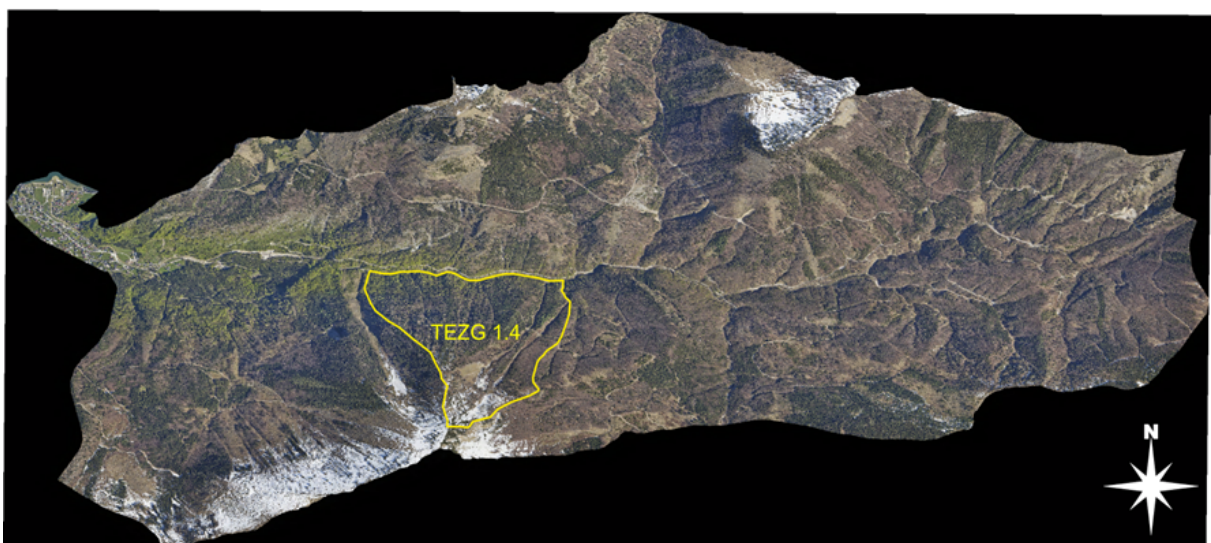
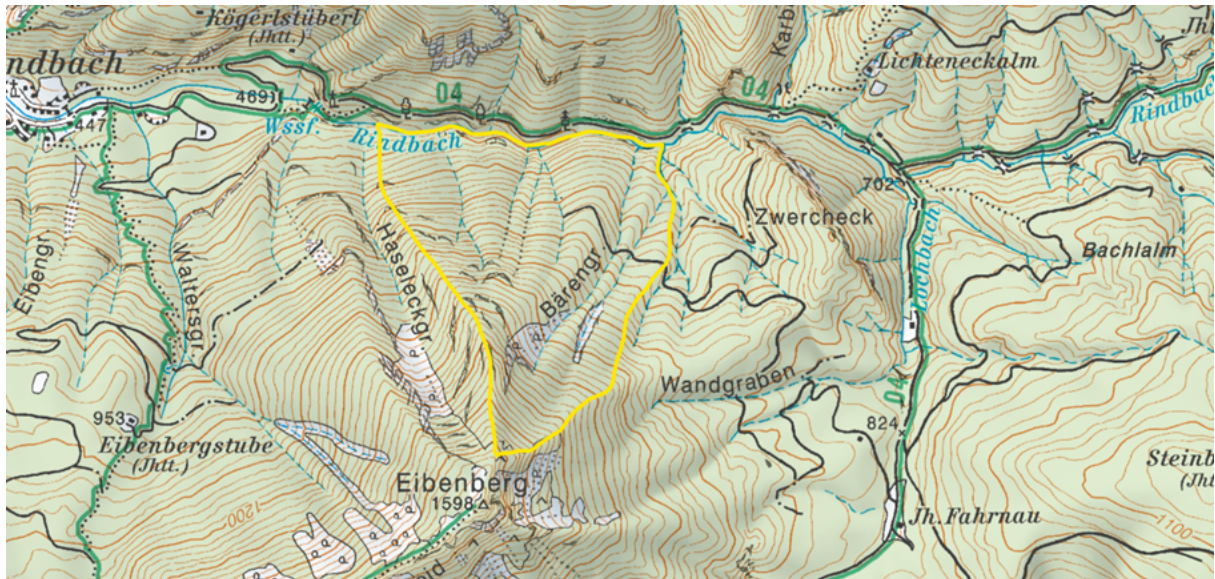
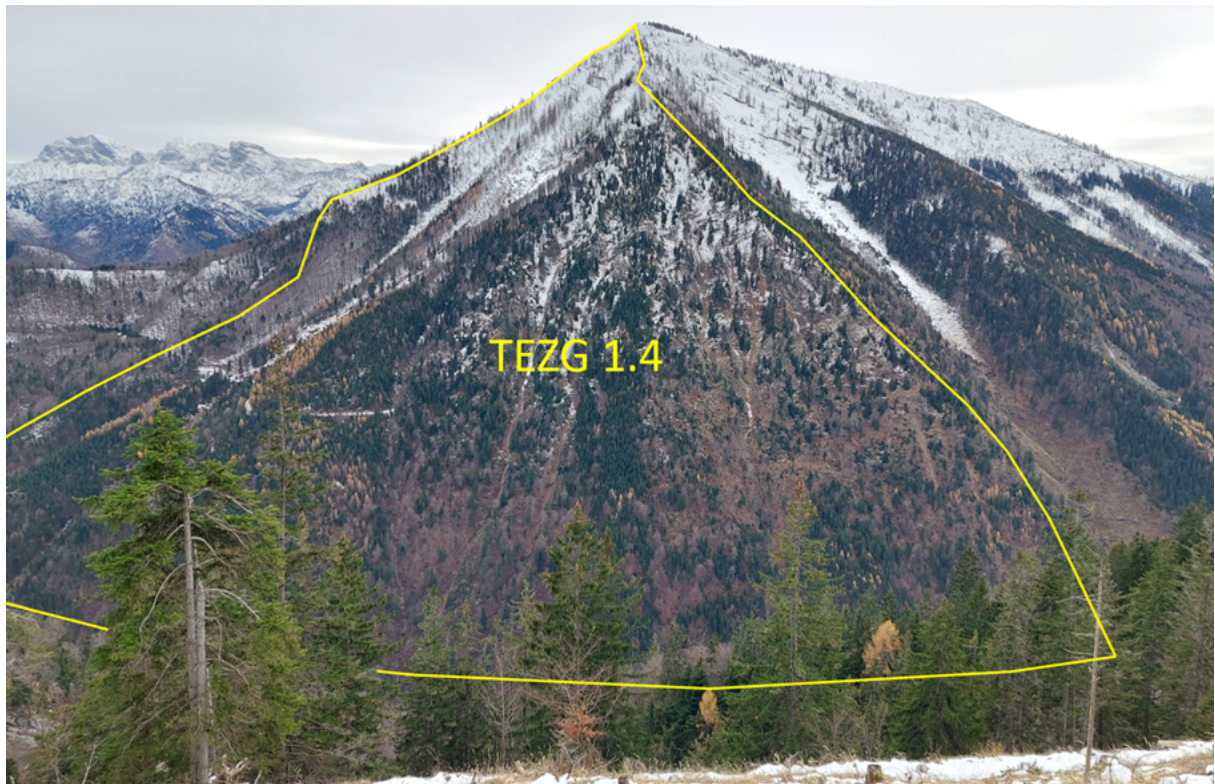


Abbildung 119 Ausgewähltes Teileinzugsgebiet (gelb) am Nord-Nordost Abhang des Eibenberges. Bildquelle: Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen



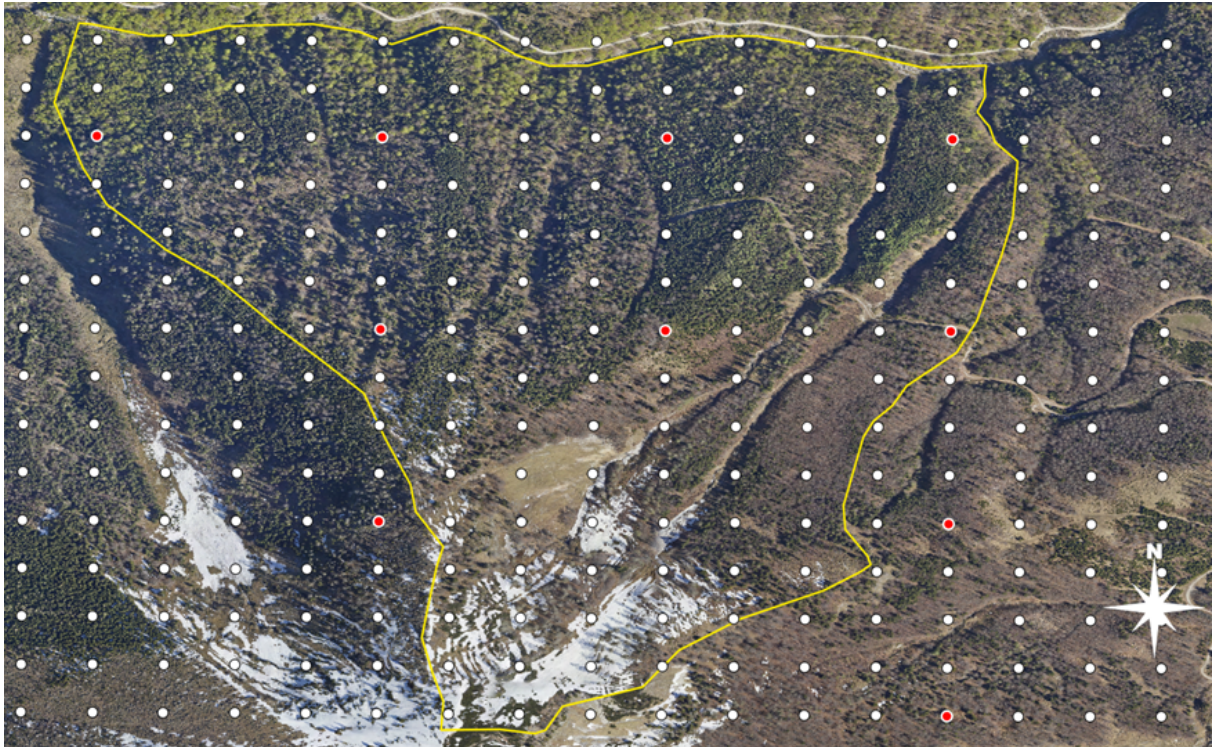
Diese Teileinzugsgebietsfläche repräsentiert die nach Norden bzw. Nordosten abfallende Flanke des Eibenberges und ist an deren Nordende vom von Osten nach Westen verlaufenden Rindbach begrenzt. Die westliche Begrenzung des MEZG-Rindbach ist der für größere Lawinen-Ereignisse bekannte Haseleckgraben. Die östliche Begrenzung schließt die Bärengräben mit ein (Abbildung 120).

Abbildung 120 Gegenhangaufnahme auf das ausgewählte Teileinzugsgebiet. Bildquelle: M. Plörer vom 28.11.2022



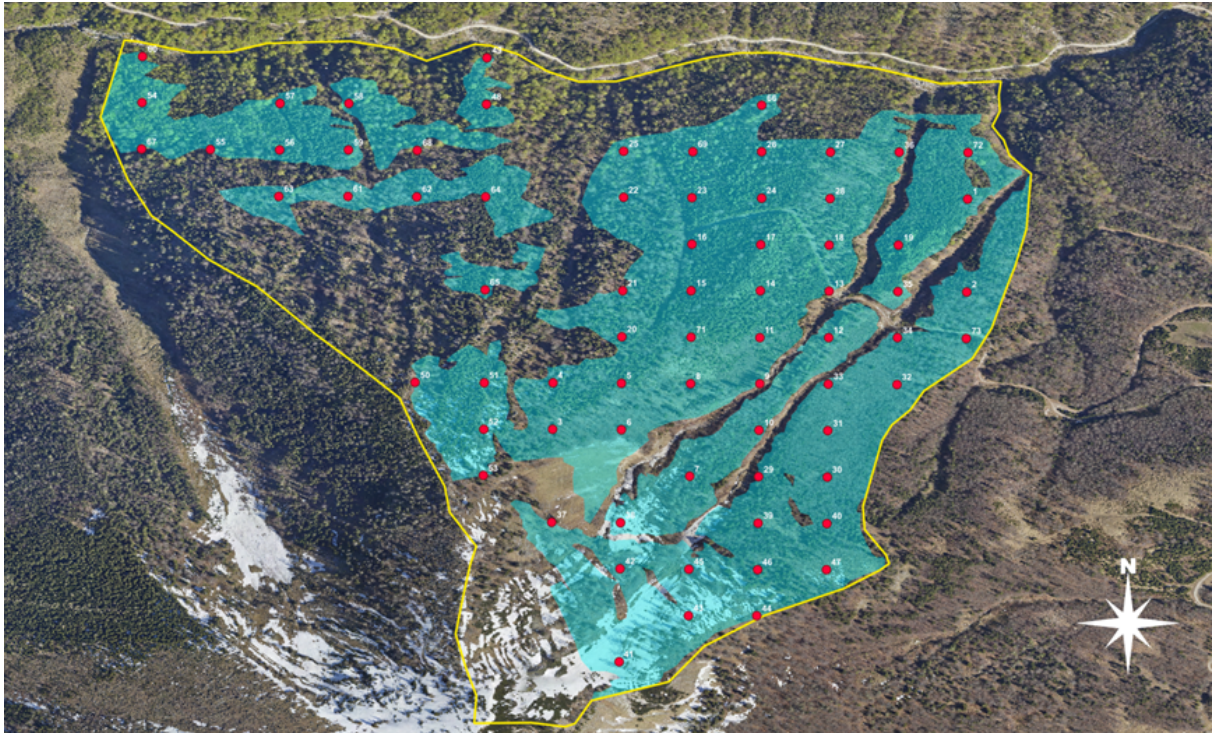
In weiterer Folge wurde ein 100 x 100 m Punktraster erstellt, welches in die bestehende Inventur der ÖBf (400 x 400 m Raster) „eingehängt“ - sprich verdichtet in Deckung gebracht - wurde (Abbildung 121).

Abbildung 121 ÖBf Stichprobeninventurpunkte im 400 x 400 m Raster (rote Punkte) und für den Projektzweck verdichtetes Stichproben-Raster mit 100 x 100 m (weiße Punkte)



Durch die Verdichtung des Stichprobenrasters von 400 m auf 100 m ergab sich eine vorläufige Stichprobenanzahl von 123. Da das Gebiet jedoch teilweise sehr steil und von Felsstufen sowie Rinnen durchsetzt ist, wurde zur Gewährleistung der Arbeitssicherheit eine maximale Hangneigung von 40° für die Begehung festgelegt. Auf Basis eines Digitalen Geländemodells (DGM) wurden daher alle Flächen mit einer Neigung von mehr als 40° von der Stichprobenahme ausgeschlossen. Die in Abbildung 122 dargestellten Bereiche gelten aufgrund ihrer Neigung von unter 40° als grundsätzlich begehbar. Alle Stichprobenpunkte, die innerhalb dieser ausgewiesenen Flächen liegen, wurden für die terrestrischen Aufnahmen berücksichtigt. Somit reduzierte sich die Zahl der potenziell zu begehenden Stichprobenpunkte auf 72.

Abbildung 122 Auf begehbare Bereiche reduzierte Flächen (türkis) mit den darin aus dem Raster extrahierten Stichprobenpunkten (rot)



Terrestrische Stichprobeaufnahme

Aufsuchen und Markieren des Stichprobepunktes

Eine Kombination aus Karten, Satellitenbildern und einem GNSS-Empfänger (EMLID Reach RS2+) wurde verwendet, um jedes Stichprobepunktzentrum (SPZ) anhand der Koordinaten des vorab ausgewählten Stichprobennetzes zu lokalisieren. Befand sich ein Punkt an einer ungeeigneten Stelle (z.B. in einem Bachbett oder auf einer Forststraße) oder zu nahe am Waldrand, sodass ein Teil der Stichprobe außerhalb des Waldes gelegen hätte, wurde der Punkt um 20 m in eine der Hauptrichtungen des Gitternetzes verlegt (zuerst nach Norden, dann Westen, Süden, Osten). Damit das SPZ bei künftigen Erhebungen wiedergefunden werden kann, wurde es mit einem 15 cm langen Vermarkungsrohr dauerhaft markiert. Zur besseren Auffindbarkeit des Rohrs wurden zwei nahegelegene Bäume oder markante Felsobjekte als Versicherungspunkte (VPI und VPII) gekennzeichnet. Für diese wurden Baumart, Brusthöhendurchmesser (BHD), Entfernung und Azimut zum SPZ dokumentiert. Die exakten Koordinaten des SPZ wurden mit dem GNSS-Gerät erfasst. (Abbildung 123).

Abbildung 123 Vermessung des SPZ und der Versicherungspunkte (VPI & VPII), markiert mit grünem Marker

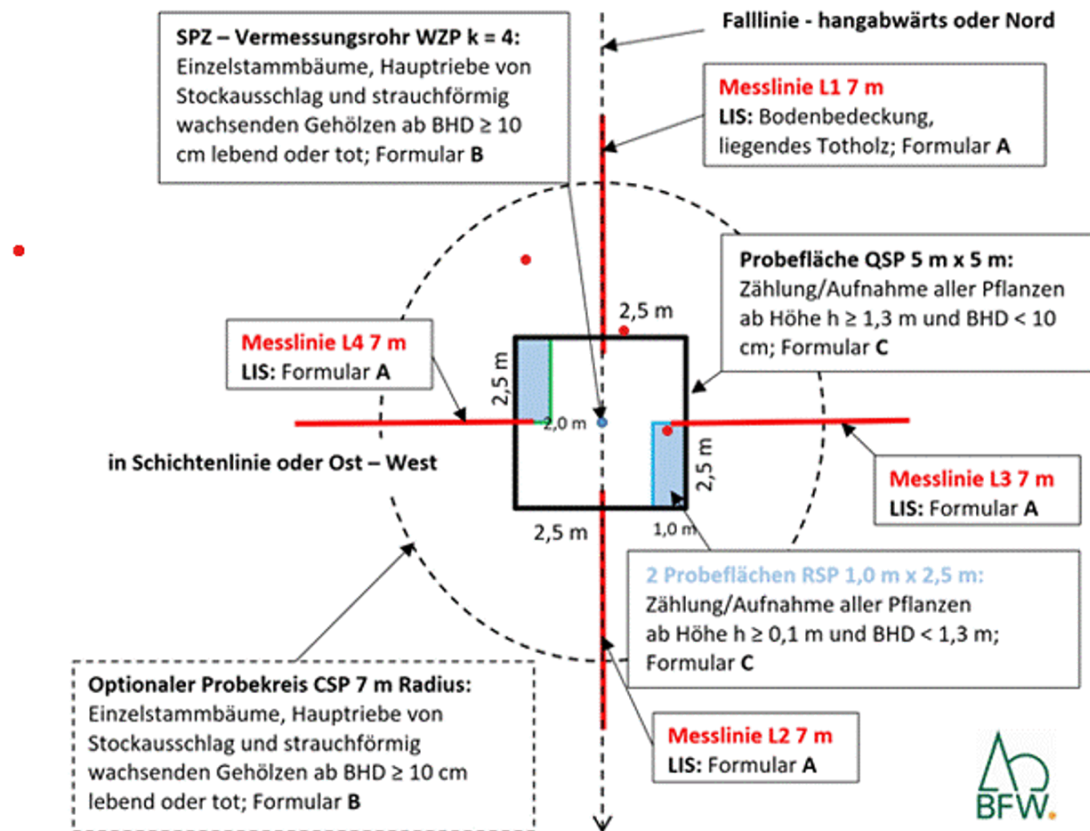


Aufnahmedesign

Die terrestrische Aufnahme besteht aus vier Teilen, die um das SPZ erfasst wurden (Abbildung 124):

- Allgemeine Dokumentation: Vermarkung der Stichprobe.
- LIS: Aufnahme der Bodenvegetation, Bodenbedeckung und des liegenden Totholzes.
- QSP und RSP: Aufnahme von Jungwuchs und Sträuchern mittels QSP (BHD < 10 cm und Höhe $\geq 1,3$ m) und RSP (Höhe 0,1–1,3 m).
- WZP4 und CSP7: Aufnahmen von Einzelstammbäumen, Stockausschlägen und Sträuchern (BHD ≥ 10 cm und Höhe $\geq 1,3$ m) mittels WZP, Zählfaktor $k = 4$ sowie Probekreis (CSP), Radius = 7 m

Abbildung 124 Design der terrestrischen Stichprobenaufnahme im Teileinzugsgebiet 1.4 des MEZG-Rindbach



Allgemeine Dokumentation

Kurze Parzellenbeschreibungen mit SPZ-Koordinaten, Referenzbaumangaben (VPI, VP II) und Seehöhe wurden dokumentiert. Ergänzend erfolgte eine fotografische Erfassung des umgebenden Waldbestandes. Liegt der Plot in einer Lücke, erfolgte die Unterscheidung und Kennzeichnung folgender Typen:

- Bestandeslücke (Gap): Mindestfläche 100 m^2 , Mindestbreite 10 m (Kronenrand zu Kronenrand, entlang der Höhenlinien).
- Blöße (Blanc): Mindestfläche 500 m^2 , Mindestbreite 20 m (Kronenrand zu Kronenrand).

Linienstichprobe

Vegetationsbedeckung und Totholz beeinflussen die Lawinenbildung, indem sie Diskontinuitäten in der Schneesichtung schaffen (Schönenberger et al., 2005; Teich et al., 2019). Zur

Erfassung von Waldvegetation und Totholzmenge hat sich die standardisierte Linienstichprobe bewährt (Buckland et al., 2007; Fraver et al., 2018; Waddell, 2002). Die Erhebung erfolgt entlang von vier 7 m langen Messlinien nach dem Line Intersect Sampling (Canfield, 1941):

- L1: Hangaufwärts in Fallrichtung
- L2: Hangabwärts in Fallrichtung
- L3: Entlang der Höhenlinie orografisch links
- L4: Entlang der Höhenlinie orografisch rechts

Neigung (%) und Azimut (Gon) der Linien werden gemessen (vgl. Abbildung 125). An jedem vollen Meter wird die dominante Bodenbedeckung (>50 %) erfasst und im Formular dokumentiert (siehe Tabelle 28).

Tabelle 28 Bodenbedeckungskategorien für die Linienstichproben (7 m)

Typ	Beschreibung
Rock	Fels
Blocks	Gesteinsblöcke ab Kopfgröße
BlockM	Gesteinsblöcke mit Moosdecke
Stones	Steine (Schutt, Geröll) unter Kopfgröße
Soil	Offener Boden oder feiner Schutt ohne Streu und Vegetation
Clitter	Nadelstreu, Äste, Reisig, Stöcke, Stämme
Litter	Laubstreu
Shrubs	Sträucher und Jungwuchs
Dshrubs	Zwergsträucher und strauchförmige Stauden
Tforbs	Hochstauden mindestens kniehoch
Herbs	Niederwüchsige Kräuter
HGras	Hohes Gras ca. kniehoch
LGras	Niedriges Gras, ca. unter kniehoch
EMoos	Erdmoose, Moose auf mineralischen Untergrund
SMoos	Sumpf / Torfmoos

Abbildung 125 Linienstichprobe (grüne Schnur) zur Erfassung am Stichprobepunkt Nr. 32



Parallel zur Erfassung der Bodenbedeckung werden liegende, die Messlinie schneidende Stämme (Totholz) ab einem Durchmesser von 10 cm an der Schnittstelle gezählt und in drei Größenklassen eingeteilt: WDP ($10 \text{ cm} \leq D < 20 \text{ cm}$), WDT1 ($20 \text{ cm} \leq D < 40 \text{ cm}$) und WDT2 ($D \geq 40 \text{ cm}$) (Abbildung 126).

Abbildung 126 Totholz Erfassung in MEZG-Rindbach (TEZG 1.4)



Erhebung der Strauchschicht (Jungwuchs und Sträucher)

Die Aufnahme von Jungwuchs und Sträuchern erfolgte auf festgelegten Probeflächen: einer QSP von 5 × 5 m und einer RSP von 1,0 × 2,5 m (Abbildung 124).

Jungwuchs bis zu einer Höhe von 1,3 m wurde in zwei Höhenklassen unterteilt:

- (1) Klasse: 0,1–0,49 m
- (2) Klasse: 0,5–1,29 m

Die Anzahl der Individuen pro Baumart wurde innerhalb der zwei RSP-Flächen erfasst und zusammengerechnet. Sträucher ab einer Höhe von $\geq 1,3$ m wurden in drei Brusthöhen-durchmesser (BHD) Klassen eingeteilt:

- (3) Klasse: < 3 cm
- (4) Klasse: 3–6,9 cm

(5) Klasse: 7–9,9 cm

Die Anzahl der Sträucher pro Baumart wurde innerhalb der beiden Hälften der QSP-Fläche erfasst und zusammengerechnet. Für jede Baumart und Höhenklasse wurden jeweils drei Exemplare vermessen. Dabei wurden Baumart und Höhe erfasst; bei Bäumen ab 1,3 m Höhe wurde zusätzlich der BHD gemessen. Darüber hinaus wurden die gezählten Bäume in allen fünf Klassen auf Verbiss- und Schälschäden untersucht und entsprechenden Verbisskategorien zugeordnet (Tabelle 29).

Tabelle 29 Verbiss und Schälschaden Kategorien der Jungwuchs

Abkürzung	Beschreibung
Brow1	Der Leittrieb wurde in den letzten 4 Jahren mindestens 1-mal höchstens jedoch 2-mal verbissen
Brow2	Der Leittrieb wurde in den letzten 4 Jahren mindestens 3-mal verbissen
Brow3	Verbiss der Leit- und Seitentriebe mit starkem Blattmassenverlust, das Überleben der Pflanze ist fraglich
Scrub	Kollerbusch
Nobrow	Kein Nachweis von Verbiss

Zusätzlich wurden folgende Merkmale erfasst:

- Vorhandensein von Zaunschütz für die Verjüngung (Ja/Nein)
- Lichtmangel (Ja/Nein)
- Hinweise auf Aufforstung (Ja/Nein)
- Hinweise auf Schneeschäden (Ja/Nein)
- Hinweise auf biotische Schäden (Ja/Nein)

Winkelzählprobe (WZP4) und Probekreis (CSP7)

Die stehende Bestockung ab einem BHD von 10 cm (lebend und tot) wurde mittels einer Winkelzählprobe mit Zählfaktor 4 (WZP4) sowie innerhalb eines Probekreises mit 7 m Radius (CSP7) erfasst. Die WZP4 wurde vom SPZ aus mit einem Spiegel-Relaskop (Metric Standard) durchgeführt, wobei die Aufnahmeschwelle bei $\text{BHD} \geq 10 \text{ cm}$ lag. Der CSP7-Probekreis

begann am SPZ; mithilfe eines Vertex-Geräts wurde eine horizontale Distanz von 7 m gemessen, und alle Bäume innerhalb dieses Kreises wurden im Uhrzeigersinn erfasst.

Für jeden erfassten Baum wurden folgende Merkmale dokumentiert:

- Baumart
- Entfernung zum Stichprobenzentrum (SPZ) mit $\pm 0,1$ m Genauigkeit
- Azimut zum SPZ mit $\pm 0,5$ Gon Genauigkeit
- Brusthöhendurchmesser (BHD) mit $\pm 0,1$ cm Genauigkeit
- Zustand/Status (siehe Abbildung 127)
- Habitus
- Stammschäden

Die Entfernung zwischen Probebaum und SPZ wurde mit einem Vertex-Hypsometer (Haglöf AB, Schweden) gemessen. Der Azimut wurde mittels Wyssen-Universalkompass mit einer Genauigkeit von 0,5 Gon bestimmt. Der BHD wurde in 1,3 m Höhe über dem Waldboden an der bergseitigen Stammseite jeweils zweifach – parallel und senkrecht zum Hang – mit einer Haglöf-Schieblehre gemessen. Der Mittelwert der beiden Messungen wurde als durchschnittlicher BHD verwendet.

Für jede Gehölzart der WZP4 wurde der Grundflächenzentralstamm durch paarweises Wegstreichen des kleinsten und größten BHD bestimmt. Höhe und Kronenansatz wurden an allen Grundflächenzentralstämmen gemessen: Die Höhe entspricht dem senkrechten Abstand vom Fußpunkt (im geneigten Gelände bergseits) bis zum Wipfel, gemessen mit dem Vertex. Der Kronenansatz wurde als mittlere Höhe der ersten drei lebenden Hauptäste erfasst.

Die GPS-Koordinaten der Grundflächenzentralstämme wurden an der Stammachse aufgenommen. Zusätzlich wurden der zweitschwächste und zweitstärkste Stamm je Baumart innerhalb der WZP4 hinsichtlich Höhe, Kronenansatz und Positionskoordinaten erfasst.

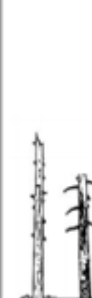
Die Auswahl der Vergleichsstämme erfolgte nachfolgenden Kriterien:

- Zweitschwächster Baum: Baum mit dem nächstgrößeren BHD nach dem kleinsten gemessenen BHD. Befindet sich dieser Baum am SPZ, wird stattdessen der schwächste Stamm erfasst.

- Zweitstärkster Baum: Baum mit dem nächstkleineren BHD zum größten gemessenen BHD. Befindet sich dieser Baum am SPZ, wird stattdessen der stärkste Stamm erfasst.

Abbildung 127 Zustandsklassifikation der Bäume, modifiziert nach Maser et al. (1979) und Backhouse & Lousier (1991)

Zustand

									
Status 1	Status 2	Status 3	Status 4	Status 5	Status 6	Status 7	Status 8	Status 9	Status 10
alive	alive - top substitute	alive crown broken	alive declining	dead - hard	dead - hard bark peeling	dead - clean soft/hard	"freshly" broken - hard	broken - soft/hard	broken - soft (decomposed)
Trees (or shoots of forked woody plants) alive				Snags					

Auswertung

Zur Charakterisierung der Bestandesstruktur und zum Vergleich mit LiDAR- und Orthofotodaten wurden die terrestrischen Stichprobendaten in vier Strata unterteilt, basierend auf der vertikalen Bestandesstruktur:

- Bodenbedeckung der Bodenvegetation
- Verjüngung (Jungwuchs) bis 1,3 m Höhe und Strauchschicht (Sträucher ab 1,3 m Höhe und BHD bis 9,99 cm)
- Baumschicht ab 10 cm BHD

Zusätzlich wurde eine kombinierte Auswertung der Strauch- und Baumschicht durchgeführt.

Die Analyse fokussierte auf Parameter, die sowohl erhoben wurden als auch für Schutzwirkungen des Waldes relevant sind:

- Stammzahl (Jungwuchs, Strauchschicht, Baumschicht)
- Grundfläche (Strauchschicht, Baumschicht)

- Mittlere Höhe (Jungwuchs, Baumschicht)
- BHD-Verteilung (Baumschicht)
- Artenzusammensetzung (Laubholz- und Nadelholzanteil)
- Totholzmenge
- Deckungswert der Bodenvegetation

Für die Berechnung der Bestandesparameter im Gebiet des MEZG-Rindbach wurde ein im Rahmen des BLÖSSEN-Projekts entwickeltes Excel-Tool angepasst und verwendet. Eine detaillierte Beschreibung des Tools findet sich in Perzl & Rössel (2018).

Bodenbedeckung, Bodenvegetation und Totholz

Aus den Linienstichproben wurden für jede Parzelle der gesamte Deckungswert der Bodenvegetation (DWBV), der gesamte Deckungswert der nicht-vegetativen Bodenbedeckung (DWNV) sowie die relativen Anteile des Deckungswerts (ADW) an der erfassten Vegetationsgruppen berechnet.

Zur Ermittlung der Bodenvegetationsbedeckung wurde die Anzahl der Beobachtungen von Sträuchern bis Sumpfmoss (Shrubs:SMoss) entlang der einzelnen Linien aufsummiert und durch die Linienlänge von 7 m geteilt. Die durchschnittliche Bodenvegetationsbedeckung pro Stichprobepunkt wurde als Mittelwert der vier Linienstichproben berechnet. Analog erfolgte die Berechnung der nicht-vegetativen Bodenbedeckung.

Tabelle 30 Aggregationsparameter (Referenzwerte) der Linienstichprobe, adaptiert nach Perzl & Rössel (2018)

Abkürzung	Parameter (sofern nicht anders angeführt nur lebende Vegetation)
Rocks	Anteil von Felsen (0–1)
Blocks	Anteil von Gesteinsblöcken ab Kopfgröße (0–1)
BlockM	Anteil von Blockmoosen an der Deckung (0–1)
Stones	Anteil Schutt, Geröll unter Kopfgröße (0–1)
Soil	Anteil offener Boden oder feiner Schutt ohne Streu und Vegetation (0–1)
CLitter	Anteil von Nadelstreu (Nadelbaum), Äste, Reisig, Stöcke, Stämme (0–1)
LLitter	Anteil von Laubstreu (0–1)
Shrubs	Anteil von Sträuchern und Jungwuchs bis 1,3 m Höhe an der Deckung (0–1)

Abkürzung	Parameter (sofern nicht anders angeführt nur lebende Vegetation)
DShrubs	Anteil von Zwergsträuchern an der Deckung (0–1)
TForbs	Anteil von Hochstauden an der Deckung (0–1)
Herbs	Anteil von krautigen Pflanzen an der Deckung (0–1)
HGras	Anteil von hohen Gräsern an der Deckung (0–1)
LGras	Anteil von niedrigen Gräsern an der Deckung (0–1)
EMoos	Anteil von Erdmoosen an der Deckung (0–1)
SMoos	Anteil von Sumpfroosen an der Deckung (0–1)
DWNV	Deckungswert der Boden nicht aus Vegetation (0–1)
DWBV	Deckungswert der Bodenvegetation (0–1)
BVdo	Dominante Pflanzengruppe der Bodenvegetation (Text)
hmBV	Mittlere Höhe der Bodenvegetation (inklusive Sträucher und Jungwuchs < 1,3 m)
CWD-DWP	Totholzvolumen liegend („coarse woody debris“) $10\text{ cm} \leq D \leq 20\text{ cm}$ [m^3/ha]
CWD-DWT1	Totholzvolumen liegend („coarse woody debris“) $20\text{ cm} \leq D \leq 40\text{ cm}$ [m^3/ha]
CWD-DWT2	Totholzvolumen liegend („coarse woody debris“) $D > 40\text{ cm}$ [m^3/ha]
CWD-Total	Totholzvolumen liegend („coarse woody debris“) (DWP +DWT1 +DWT2)

Tabelle 31 Parameter der Bodenbedeckung durch Bodenvegetation, adaptiert nach Perzl & Rösler (2018)

Kompartiment		aus LIS	aus LIS und QSP
Bodenvegetation		DWBV	hmBV [m] =a
Shrubs	Sträucher Jungwuchs	Shrubs	Shrubs*hmShrubsBV
TForbs	Hochstauden	TForbs	TForbs * 0,80
Herbs	Kräuter	Herbs	Herbs * 0,15
HGras	Hohes Gras	HGras	HGras * 0,80
LGras	Niedriges Gras	LGras	LGras * 0,20
EMoos	Erdmoose	EMoos	EMoos * 0,05
SMoos	Torfmoose	SMoos	SMoos * 0,05
BlockM	Moose auf Blockwerk	BlockM	BlockM * 0,05
BVdo	Dominante Artgruppe	ADW $\geq 55\%$	---

Jungwuchs (Verjüngung) und Strauchschicht

Verjüngung und Sträucher wurden in fünf Höhenklassen unterteilt. Verjüngung umfasst Vegetation mit einer Höhe von 0 bis 1,2 m, während Sträucher ab einer Höhe von 1,3 m und mit einem Brusthöhendurchmesser (BHD) unter 10 cm erfasst werden. Diese Sträucher werden den Klassen 3, 4 und 5 zugeordnet (Tabelle 32).

Tabelle 32 Klassen, Abkürzungen und Beschreibung der fünf Höhenklassen von Jungwuchs und Strauchschicht

Klasse	Abkürzung	Beschreibung
1	JHKL1	Jungwuchs der Höhenklasse 1 ($0,1 \leq h \leq 0,5$ m)
2	JHKL2	Jungwuchs der Höhenklasse 2 ($0,5 \leq h \leq 1,0$ m)
3	JHKL3	Jungwuchs der Höhenklasse 3 ($h \geq 1,3$ m und $BHD < 3$ cm)
4	JHKL4	Jungwuchs der Höhenklasse 4 ($3 \text{ cm} \leq BHD < 7$ cm)
5	JHKL5	Jungwuchs der Höhenklasse 5 ($7 \text{ cm} \leq BHD < 10$ cm)

Für die Strauchschicht wurden die mittlere Höhe, die durchschnittliche Lorey'sche Höhe sowie die Stammzahlen (N) und Grundflächen (BA) pro Hektar getrennt nach Laub- und Nadelholz bestimmt. Zudem wurden für die forstlichen Gehölze (FG) die Lorey'sche Höhe, N und BA ausgewiesen. Für den Jungwuchs bzw. die forstlichen Gehölze erfolgte die Berechnung der BA sowohl für einzelne Hauptbaumarten als auch für Artgruppen (Perzl & Rössel, 2018).

Tabelle 33 Aggregationsparameter (Referenzwerte) der terrestrischen Stichprobe für die Strauchschicht, adaptiert nach Perzl & Rössel (2018)

Abkürzung	Parameter (sofern nicht anders angeführt lebender Bestand)
hmSS	Mittlere Höhe der Strauchschicht (Sträucher und Jungwuchs $h \geq 1,3$ m) [m]
hmLSS	Lorey'sche Mittelhöhe der Strauchschicht (Sträucher und Jungwuchs $h \geq 1,3$ m) [m]
NCSS	Stammzahl der Strauchschicht Nadelhölzer [1/ha] (Sträucher und Jungwuchs $h \geq 1,3$ m) [m]
NDSS	Stammzahl der Strauchschicht Laubhölzer [1/ha] (Sträucher und Jungwuchs $h \geq 1,3$ m) [m]
NSS	Stammzahl der Strauchschicht [1/ha] (Sträucher und Jungwuchs $h \geq 1,3$ m) [m]
BACSS	Grundfläche (basal area) der Nadelhölzer der Strauchschicht [m ² /ha]
BADSS	Grundfläche (basal area) der Laubhölzer der Strauchschicht [m ² /ha]

Abkürzung	Parameter (sofern nicht anders angeführt lebender Bestand)
BASS	Grundfläche (basal area) der Strauchschicht [m^2/ha]
J2hmL	Lorey'sche Mittelhöhe der FG der Jungwuchs ($h \geq 1,3 \text{ m}$) [m]
J2dmba	Durchmesser (BHD) des Grundflächenmittelstamms der FG der Strauchschicht (Jungwuchs $h \geq 1,3 \text{ m}$) [cm]
J2N	Stammzahl der FG der Strauchschicht [$1/\text{ha}$] (Jungwuchs $h \geq 1,3 \text{ m}$) [cm]
J2BA	Grundfläche der FG der Strauchschicht [m^2/ha] (im Jungwuchs 2)
J2BA_FI	Grundfläche der Fichten Jungwuchs $h \geq 1,3 \text{ m}$ [m^2/ha] (im Jungwuchs 2)
J2BA_LAE	Grundfläche der Lärche Jungwuchs $h \geq 1,3 \text{ m}$ [m^2/ha] (im Jungwuchs 2)
J2BA_TA	Grundfläche der Tannen Jungwuchs $h \geq 1,3 \text{ m}$ [m^2/ha] (im Jungwuchs 2)
J2BA_BU	Grundfläche der Buchen Jungwuchs $h \geq 1,3 \text{ m}$ [m^2/ha] (im Jungwuchs 2)
J2BA_SLH	Grundfläche der Fichten Jungwuchs $h \geq 1,3 \text{ m}$ [m^2/ha] (im Jungwuchs 2)

Baumschicht

Die Referenzwerte für die Baumschicht (BS) wurden aus der WZP4 sowie separat aus dem CSP7 abgeleitet. Analog zur Strauchschicht wurden dabei die mittlere Höhe, die durchschnittliche Lorey'sche Höhe sowie N und BA pro Hektar, getrennt nach Laub- und Nadelholz, bestimmt.

In der WZP4 wurde die Höhe ausschließlich an den Grundflächenzentralstämmen, dem zweitstärksten und den zwei schwächsten Probestämmen gemessen. Für die übrigen Probestämme wurde die Höhe mittels gebietsspezifischer Baumhöhenmodelle berechnet, welche aus dem BHD für jede Gehölzart im Rahmen des BLÖSSEN-Projekts entwickelt wurden. Für die Baumart *Fagus sylvatica*, die im BLÖSSEN-Projekt nicht erfasst wurde, kam das Naslund-Höhenmodell aus dem R-Paket „lform“ (Version 1.6) zur Anwendung (Mehtatalo & Kansanen, 2022).

Tabelle 34 Aggregationsparameter (Referenzwerte) der Baumschicht aus den Referenzstichproben, adaptiert nach Perzl & Rössel (2018)

Abkürzung	Parameter (sofern nicht anders angeführt lebender Bestand)
hmBS	Mittlere Höhe der Baumschicht (BHD $\geq 10 \text{ cm}$) [m]
hmLBS	Lorey'sche Mittelhöhe der Baumschicht (BHD $\geq 10 \text{ cm}$) [m]

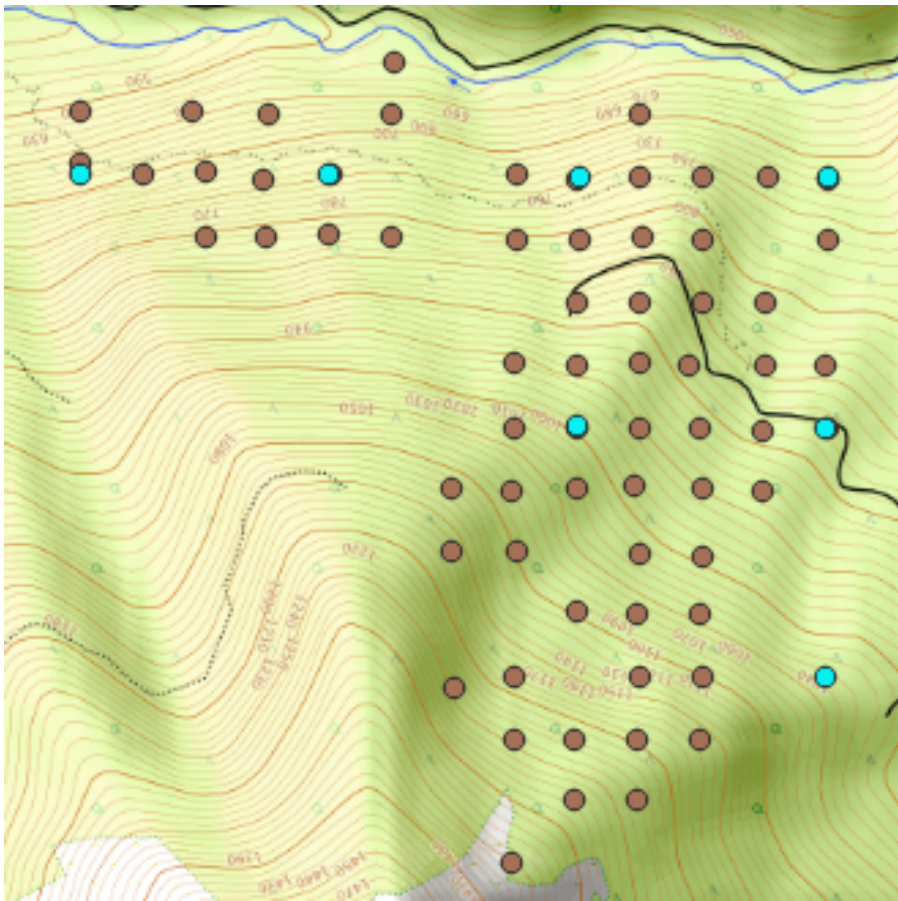
Abkürzung	Parameter (sofern nicht anders angeführt lebender Bestand)
NCBS	Stammzahl der Baumschicht Nadelhölzer [1/ha] (BHD $\geq$ 10 cm)
NDBS	Stammzahl der Baumschicht Laubhölzer [1/ha] (BHD $\geq$ 10 cm)
NBS_all	Stammzahl der Baumschicht lebend und tot [1/ha] (BHD $\geq$ 10 cm)
BACBS	Grundfläche (basal area) der Baumschicht Nadelhölzer [m ² /ha]
BADS	Grundfläche der Baumschicht Laubhölzer [m ² /ha]
BABS_all	Grundfläche der Baumschicht lebend und tot [m ² /ha]
BSBA_FI	Grundfläche der Fichten der FG der Baumschicht [m ² /ha]
BSBA_LAE	Grundfläche der Lärchen der FG der Baumschicht [m ² /ha]
BSBA_TA	Grundfläche der Tannen der FG der Baumschicht [m ² /ha]
BSBA_BU	Grundfläche der Buchen der FG der Baumschicht [m ² /ha]
BSBA_SLH	Grundfläche anderer Laubhölzer der FG der Baumschicht [m ² /ha]

Zur Analyse signifikanter Unterschiede zwischen den beiden in-situ-Verfahren (WZP4 und CSP7) wurden für jede Untersuchungsvariable (Grundfläche, Stammzahl und mittlere Bestandeshöhe) gepaarte t-Tests durchgeführt.

Vergleich der von BFW und ÖBf erhobenen Daten

Die Daten der ÖBf stammen aus der Forstinventur 2022, die im Rahmen ihres permanenten Stichprobennetzwerks erhoben wurde. Im Untersuchungsgebiet MEZG-Rindbach sind insgesamt 120 ÖBf-Stichprobepunkte (Abbildung 128) verortet. Aufgrund der heterogenen Waldstrukturen im MEZG-Rindbach wurden für den Vergleich jedoch ausschließlich jene ÖBf-Stichprobepunkte berücksichtigt, die mit dem terrestrisch erhobenen Untersuchungsgebiet (TEZG 1.4) räumlich überlappen (Abbildung 129). Dies führte zu einer Reduktion der Vergleichs-Stichprobenanzahl auf sieben. Aufgrund unterschiedlicher Erhebungsprotokolle und Prioritäten wurden nur die Bestandesmerkmale mittlere Baumhöhe, BHD, Stammzahl sowie das Höhen-Durchmesser-Verhältnis (HD-Wert) in die Analyse einbezogen. Da die ÖBf-Inventur auf der WZP4-Methode basiert, wurden für den Vergleich ausschließlich der entsprechenden WZP4-Ergebnisse der BFW-Erhebung verwendet. Zur Prüfung signifikanter Unterschiede zwischen den Erhebungen des BFW und der ÖBf wurden für jede Untersuchungsvariable (Baumhöhe, BHD, HD-Wert und Stammzahl) artspezifisch Welch's t-Tests angewandt.

Abbildung 129 Die sieben ÖBf-Stichprobepunkte (türkis dargestellt), die für den Vergleich mit den 66 BFW-Stichprobepunkten (braun dargestellt) verwendet wurden



Methoden TEIL 2: Erhebung schutzwirkungsrelevanter Merkmale aus drohnengestützten Fernerkundungsdaten

Literaturüberblick

Grundsätzlich stehen eine große Vielfalt verschiedener Sensoren, Plattformen und Methoden zur Verfügung, um aus der Ferne flächendeckende Informationen über den Zustand, die Struktur oder die Baumartenzusammensetzung eines Bestandes zu erlangen. Diese reichen von aktiven (Sonnenlicht- und teilweise Wetter-unabhängigen) Systemen, wie Laserscanning oder Radar, zu passiven Sensoren, welche die auf der Erdoberfläche reflektierte Strahlung in verschiedenen Wellenlängenbereichen aufzeichnen (z.B. Tageslicht-, Nahinfrarot-, Thermal- oder Mikrowellensensoren) (Boyd & Danson, 2005). Neben ihrer Bauart bedingt vor allem die Höhe über Grund, von welcher aus diese Instrumente Daten aufzeich-

nen, bzw. die Distanz vom Sensor zum gemessenen Objekt, deren geometrische und radiometrische Informationsdichte. Für die Datenaufnahmen kommen dabei verschiedenste fern- und nahbereichserkundliche Plattformen zum Einsatz (z.B. Satelliten, bemannte oder unbemannte Luftfahrzeuge, Ballone) (Fassnacht et al., 2024; Khorram et al., 2012); diese werden durch terrestrischen Plattformen ergänzt, die sowohl mobil (z.B. handgetragen oder auf Fahrzeugen befestigt) (Balestra et al., 2024; Chen et al., 2019), als auch statisch sein können (z.B. auf Stativen oder Gebäuden befestigt) (Arrizza et al., 2024; Åkerblom & Kaitaniemi, 2015). Dieses breite Spektrum an verfügbaren Systemen und Sensoren zur Datenaufnahme, deren zunehmend günstige oder gar kostenfreie Verfügbarkeit, sowie die verschiedensten Methoden für die Datenanalyse und -auswertung, hat in den letzten Jahrzehnten zu einer unübersehbaren Vielzahl von wissenschaftlichen Anwendungen und Veröffentlichungen im Bereich der forstlichen Fernerkundung geführt (z.B. White et al., 2016; Wulder & Franklin, 2012; Holmgren & Thuresson, 1998).

Die für diese Studie ausgewählten, Lawinen-spezifischen schutzwirkungsrelevanten Ziel-Indikatoren des im MEZG-Rindbach untersuchten Bestandes waren: mittlere Bestandeshöhe [m] (engl. *mean height*), Stammzahldichte [Stk. / ha] (engl. *stem density*), Brusthöhendurchmesser – BHD [cm] (engl. *mean diameter*) und Überschirmungsgrad [%] (engl. *canopy cover*).

Reduziert man das weite Feld von Fernerkundungssensoren und -methoden, auf diejenigen, die sich zur Detektion der beschriebenen schutzwirkungsrelevanten Indikatoren auf Hang-Ebene eignen, bleiben wenige relevante Systeme zurück (Lingua et al., 2021; Brožová et al., 2019). Zahlreiche Studien (z.B. Coops et al., 2021; Ramalho de Oliveira et al., 2020; Brede et al., 2019; Eitel et al., 2016) belegen, dass zur Ableitung dieser Indikatoren, eine möglichst hohe räumliche Auflösung, sprich geographische Informationsdichte notwendig ist. Gewisse relevante Parameter, wie mittlere Baumhöhen, Lückenbreiten und -längen oder Überschirmungsgrad, können mit Einschränkungen von den für das MEZG-Rindbach bereits bei Projektbeginn verfügbaren Orthophotos und Airborne Laser Scanning (ALS) Höhenmodellen abgeleitet werden (Perzl & Teich, 2021). Darüber hinaus bieten allerdings von unbemannten Luftfahrzeugen (ugs. *Drohne*) oder engl. Uncrewed Aerial Systems (UAS) mittels (extrem) hochauflösender Tageslicht- und Nahinfrarot-Luftbildkameras erhobene Daten bzw. vor allem UAS Laser Scanning (ULS) grundsätzlich die Möglichkeit, die o.g. Indikatoren mit höherer Genauigkeit und Präzision, sowie weitere Parameter wie Stammdurchmesser, Stammzahl oder Totholz unter dem Kronendach in teils unzugänglichen Bereichen zu detektieren und quantifizieren (Fraser & Congalton, 2021; Kuželka & Surový, 2018; Wieser et al., 2017). Neben der räumlichen, ist dabei allerdings auch die zeitliche Auflösung und damit

die Übereinstimmung mit dem aktuellen Waldzustand, sowie die Eignung dieser Methoden zur Detektion spezifischer forstlicher Merkmale entscheidend für deren Aussagekraft und Qualität (Perzl & Teich, 2021).

Erste wissenschaftliche Publikationen forstlicher Anwendungen von UAS wurden zu Beginn der 2010er Jahre veröffentlicht (Torresan et al., 2016). Der sprunghafte Anstieg in der Entwicklung und Verfügbarkeit leistungsstarker UAS-Plattformen und damit einhergehend, kleiner, leichter, speziell als UAS-Payload konstruierter Instrumente und Sensoren führte bald zu einer unübersehbaren Anzahl an Veröffentlichungen (Tomljanović et al., 2022). Zu den Anwendungsbereichen gehören neben der Ableitung dendrometrischer Parameter (z.B. Puliti et al., 2015; Fritz et al., 2013; Lisein et al., 2013), die Klassifikation von Beständen nach Spezies (Michez et al., 2016; Apostol et al., 2020), die Quantifizierung von forstlichen Lückenbreiten und -längen (z.B. Getzin et al., 2014), das Monitoring von Beständen nach Waldbrand (z.B. Lechner et al., 2019; Aicardi et al., 2016; Martínez-de Dios et al., 2011), oder die Überwachung von Waldzustand und (biotischen und abiotischen) Störungen (Ginzler et al., 2019; Lehmann et al., 2015; Näsi et al., 2015), neben vielen anderen Anwendungen. Während für zahlreiche der genannten Studien UAS-gestützte Tageslicht- oder Nahinfrarotsensoren, oft gepaart mit Structure-from-Motion Multi-View Stereo (SfM-MVS) Photogrammetrie (Verhoeven, 2011; Koenderink and van Doorn, 1991) eingesetzt wurden, erlaubt ULS eine weitaus höhere Informationsdichte, mit Einschränkungen auch unter dem Kronendach eines geschlossenen Bestandes (Kovanič et al., 2023).

Bei ULS wird ein Laserscanner mit hoher Pulsfrequenz (typischerweise 500 kHz) mittels eines UAS wenige Zehnermeter über dem Kronenniveau geflogen. Dabei entstehen 3D-Punktwolken, welche aufgrund ihrer hohen Punktdichte ein genaues Abbild eines Großteils des Baumes, sowie des darunter liegenden Bodens ermöglichen (Goodbody et al., 2017). Erste experimentelle forstliche Anwendungen von ULS wurden bereits im Jahr 2010 wissenschaftlich publiziert (Jaakkola et al., 2010). In diesen, wie in den kurz danach folgenden Veröffentlichungen in diesem Kontext (Wallace et al., 2012; Lin et al., 2011) wurden kompakte, leichte Laserscanner aus dem Automobilbereich auf UAS integriert und dazu verwendet dendrometrische Parameter wie Baumhöhe und -position, sowie Kronendurchmesser und BHD auf kleinen Bereichen von einzelnen Bäumen abzuleiten. Obwohl die dabei erzielten durchschnittlichen Punktdichten schon eine Größenordnung über denen von ALS lagen (<100 Punkte/m²), wurde es erst mit der Entwicklung UAS-spezifischer Instrumente von einschlägigen Herstellern (z.B. Riegl VUX-SYS; Riegl, 2025) möglich das volle Potential dieser neuen Methode der Nahbereichserkundung für forstliche Anwendungen auszuschöpfen (Mandelburger et al., 2015). Seitdem sind ULS in einer Vielzahl von forstlichen Studien vertreten

(z.B. Kukkonen et al., 2022; Wieser et al., 2016; Brede et al., 2016). Zur Ermittlung der Genauigkeit und Präzision dieser Methode wurden dabei oft Vergleichsmessungen zu anderen, etablierten Methoden vorgenommen: ULS vs. ALS (Li et al., 2024; Bruggisser et al., 2019); ULS vs. TLS (Hillman et al., 2021; Brede et al. 2019), ULS vs. Mobile Laser Scanning (MLS) (Bienert et al., 2018; Holopainen et al., 2013) oder ULS vs. SfM-MVS (Swayze et al., 2022; Rogers et al. 2020), aber natürlich auch Vergleiche zu klassischen, terrestrischen forstlichen Aufnahmen (Fraser et al., 2021; Ramalho de Oliveira et al., 2020).

Trotz der sehr hohen Punktdichten von ULS-Aufnahmen (mehrere Tausend Punkte pro m²) (Puliti et al., 2021), stößt auch diese Methode bei der Datenerhebung über vollbelaubten Laubwald- oder sehr dichte Nadelwaldbeständen an ihre Grenzen (Coops et al, 2021). Diese Einschränkungen versuchte man zum einen durch die gezielte Wahl des Aufnahmezeitpunktes von ULS-Daten über Laubwald gegenzusteuern (vor dem Blattaustrieb oder nach dem Blattabwurf (engl. *leaf-off*) (Wieser et al., 2016)). Zum anderen wurden für forstliche Anwendungen auch Daten verschiedener anderen (optischer) Sensoren zeitgleich mit ULS-Daten aufgenommen und mit diesen verschmolzen (engl. *data fusion*) mit dem Ziel, deren Genauigkeit zur Bestimmung forstlicher Indikatoren zu erhöhen (Balestra et al., 2024; Kukkonen et al., 2021). Andere Autoren berichten von zeitgleichen Aufnahmen von ULS und MLS im gleichen Bestand (Nothdurft et al., 2024; Chen et al., 2019), oder einer ULS-Befliegung über und unter dem Kronendach (Kuželka & Surový, 2018; Shao et al., 2022), und in beiden Fällen einer anschließenden Verschmelzung der Punktwolken. Beide Ansätze führten nach Angaben der Studienautor:innen zu einer deutlichen Verbesserung der Genauigkeit und Vollständigkeit der Ableitung dendrometrischer Parameter, vor allem in Bezug auf die Bestimmung des Brusthöhendurchmessers (BHD) durch die Hinzunahme von Daten, die unter dem Kronenniveau aufgenommen wurden (Wang et al., 2019).

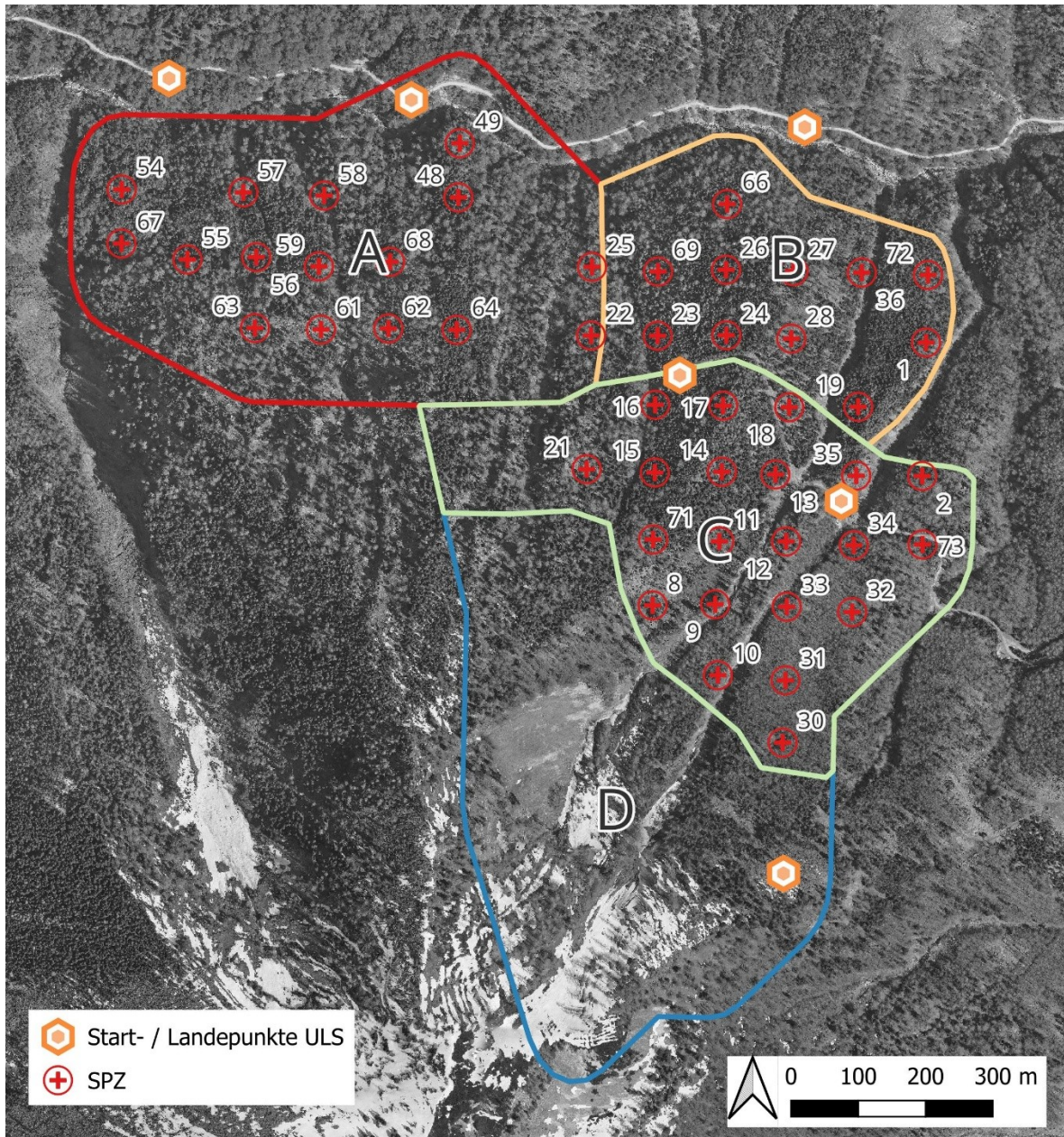
Neben der Wahl der Plattform und des Sensors für die Datenaufnahme mit ULS, spielt die Wahl der Methode für die Auswertung eine wichtige Rolle (Adhikari et al., 2023). Der Großteil der, teilweise open-source verfügbaren Software Tools, führen geometrische Analysen der Punktwolken durch und ermöglichen so die Segmentierung von Einzelbäumen und die darauf aufbauende Ableitung dendrometrischer Parameter, wie Stammzahl, BHD, durchschnittliche Lorey'sche Höhe oder Grundfläche (Kuželka et al., 2020). Diese Tools sind entweder in bestehende (open-source) Software eingebunden (z.B. sgsR in R (Goodbody et al. 2023); LIS in SAGA (Rieg et al., 2014); Spatial oder 3D Analyst in ArcGIS Pro), oder wurden als stand-alone Produkte entwickelt (z.B. SimpleTree / SimpleForest (z.B. Hackenberg et al., 2021; Hackenberg et al., 2015); RiSCAN von Riegl). Darüber hinaus wurden in verschiedenen Studien KI-basierte Tools entwickelt und publiziert (z.B. 3D deep learning (Xiang et al.,

2024); deep neural networks (Hell et al., 2022)), welche ebenfalls dendrometrische Parameter aus ULS-Daten ableiten sollen. Die Auswertemethoden lassen sich dabei in zwei Gruppen einteilen: diese, die einen Baum als Individuum von oben aufgrund seiner geometrischen Form klassifizieren und segmentieren, um anschließend weitere forstliche Parameter abzuleiten (engl. *top-down*); und die Methoden, die mit einer Schnittmenge der Punktwolke in einer gewissen Höhe über Grund beginnen Stämme zu identifizieren, um entlang dieser der Geometrie des Baumes zu folgen und schließlich über diesen Weg die Punktwolke zu Segmentieren (engl. *bottom-up*). Während der *top-down* Ansatz den Vorteil hat, dass auch weniger dichte Punktwolken dazu ausreichend sind, können, abhängig von der vertikalen Verteilung und Dichte der Punktwolke, deutlich weniger forstliche Parameter abgeleitet und für den Baum berechnet werden (Borsah et al., 2023); der *bottom-up* Ansatz dagegen erlaubt eine Vielzahl von Parametern abzuleiten, benötigt aber dafür deutlich dichtere Punktwolken unter dem Kronenniveau und längere Rechenzeiten, da die Auswertelgorithmen komplexer sind (Bruggisser et al., 2019).

ULS-Datenerhebung im MEZG-Rindbach

Die ULS-Datenerhebung im MEZG-Rindbach wurde an die Fa. Laserdata vergeben, da seitens des BFW keine ULS-fähige Drohne zur Verfügung stand. Ein entsprechendes Angebot wurde Ende Juli 2022 eingeholt und Anfang 2023 die weiteren Vorbereitungen für die Befliegung begonnen, um planmäßig eine Datenerhebung im Herbst 2023 durchführen zu können. Da der AP 7.1-Arbeitsbereich wie oben erwähnt von den ÖBf als ‚Fütterungseinstandsbereich‘ und damit ‚Ruhezone August – April‘ ausgewiesen wurde, wurde bei dem Projekttreffen in Traunkirchen im Mai 2023 die mündliche Zusage der ÖBf eingeholt, eine ULS-Befliegung innerhalb der Ruhezone nach Blattawurf im Herbst 2023 durchzuführen. Flugplanung und vorbereitende Arbeiten waren im Herbst 2023 abgeschlossen und die schriftliche Zusage des ÖBf-Revierförsters für die Durchführung der Befliegung eingeholt. Aufgrund des warmen Herbstes verzögerte sich allerdings der Blattawurf im Untersuchungsgebiet und damit der geplante Befliegungstermin. Eine für Ende November angesetzte Kampagne musste aufgrund der turbulenten Wetterlage und der bereits begonnenen Fütterung abgesagt werden.

Abbildung 130 Übersicht der ULS-Befliegungsbereiche im AP7.1-Untersuchungsgebiet (A – D); der erhobenen SPZ, welche in den beflogenen Gebieten liegen (rote Kreuze); (geplante) ULS Start- und Landepunkte (orange Sechsecke), (Hintergrund s/w-Darstellung des aktuellen Orthophotos; Quelle: WLV, Sektion OÖ)



Die erste ULS-Befliegung konnte im Frühjahr 2024 stattfinden (Tabelle 35; Abbildung 130). Ein Zugang zum Untersuchungsgebiet, welcher für die Befliegung des zentralen und des oberen Arbeitsbereichs unumgänglich war, wurde Seitens der ÖBf erst ab 1.5.2024 gestattet. Ende März konnten nach Rücksprache mit den ÖBf die beiden Flüge zur Kartierung des Gebiets A von der Forstraße, außerhalb der Ruhezone, aus stattfinden (Abbildung 131, oben

links & unten links). Aufgrund eines technischen Defekts an der Drohne, konnte der dritte Flug zur Kartierung des unteren Bereichs (*Gebiet B*) erst Mitte April durchgeführt werden. Damit war es möglich eine Fläche von 49 ha (ca. die Hälfte des Gesamtgebiets) vor dem Laubaustrieb (*leaf-off*) aufzunehmen, und so 27 der im Sommer zuvor aufgenommenen SPZ abzudecken (Tabelle 35; Abbildung 130).

Die Topografie des Arbeitsbereichs machte die ULS-Befliegung besonders herausfordernd, da i) die Steilheit (durchschnittliche Neigung ca. 35°, teilweise felsdurchsetzt, einzelne senkrechte Felsabbrüche) eine für die Detektion der Baumstämme und Ableitung detaillierter dendrometrischer Parameter wie BHD sehr wichtige Kreuzbefliegung verhinderte – es konnten in der Folge nur höhenlinien-parallele Aufnahmen stattfinden; ii) die steile nordseitige Lage den Befliegungszeitraum für die drohnen-gestützte Aufnahme von Bildern mit der Tageslichtkamera, welche für die photogrammetrische Auswertung benötigt wurden, stark eingeschränkte; iii) die teilweise Unzugänglichkeit und Unübersichtlichkeit, sowie Größe und Höhererstreckung des Gebiets einen hohen Aufwand für die Befliegung verursachte und es notwendig machte mehrere Start-/Landepunkte aufzusuchen, die teilweise nur zur Fuß erreichbar waren. Die Kombination dieser Einschränkungen mit den Auflagen der ÖBf zum Betreten des Untersuchungsgebiets führte dazu, dass der zentrale Bereich (*Gebiet C* - Abbildung 130) erst nach dem Laubaustrieb Mitte Mai 2024 mit ULS aufgenommen werden konnte (Abbildung 131, oben rechts). An diesem Termin wurde auch eine Datenaufnahme im *Gebiet D* versucht, die aber leider wegen hoher Windgeschwindigkeiten am Start-/Landepunkt, abgebrochen werden musste (Tabelle 35). Ein letzter Versuch, das Gebiet nach Laubabwurf Mitte November 2024 mit ULS zu kartieren, scheiterte aufgrund schlechter Sichtbedingungen am Startpunkt (Abbildung 131, unten rechts). Es konnten daher ca. 30 ha des Untersuchungsgebiets und damit etwa ein Viertel (18 Stück) der erarbeiteten SPZ nicht mit ULS beflogen werden.

Tabelle 35 Übersicht ULS-Kampagnen im MEZG-Rindbach

Datum	Belaubung	Gebiet	Fläche [ha]	Anz. Bilder	Anzahl SPZ	Kommentar
28/3/2024	leaf-off	A	33	945	16	Zugang zur Fläche nicht möglich – nur Flüge von der Forststrasse im Tal aus ferigegeben; zwei Flüge möglich (Gebiet A), geplanter dritter Flug scheiterte an technischem Defekt der Drohne
12/4/2024	leaf-off	B	16	489	11	Fläche darf weiterhin nicht betreten werden; Abschluss Befliegung unterer Bereich mit drittem Flug (Gebiet B)
15/5/2024	leaf-on	C	27	777	21	Freigabe für Fläche; Gebiet C beflogen; Versuch Gebiet D zu fliegen – Abbruch wegen zu hoher Windgeschwindigkeit.
13/11/2024	leaf-off	D	30	-	18	Zweiter Versuch Gebiet D zu befiegen – Abbruch wegen tiefer Wolken/Nebel

Durch den zeitlichen Versatz der Kampagnen entstand in Summe ein heterogener Datensatz, der das Untersuchungsgebiet in verschiedenen Zuständen der Waldvegetation (*leaf-on* / *leaf-off*) zeigte. Dadurch konnten die Stärken und Schwächen von ULS genauer untersucht und vertiefend analysiert werden. Im Umkehrschluss war daher aber keine flächendeckende, homogene Datenerhebung und Ableitung dendrometrischer Parameter für das gesamte Gebiet möglich, und damit nicht für einen flächendeckenden Vergleich zwischen ULS und den terrestrisch erhobenen Daten verfügbar. Da die *leaf-on* und *leaf-off* Datensätze deutliche Unterschiede in der vertikalen Punktverteilung und den baumartenspezifischen Geometrien aufwiesen, wurden diese für die weitere Prozessierung getrennt voneinander behandelt. Obwohl in der Folge der Hauptfokus der Auswertung und Analyse auf den ULS-Daten liegt, sollen diese auch mit anderen verfügbaren Datensätzen / Fernerkundungsmethoden verglichen werden (ALS & UAS-Photogrammetrie - UAS-P).

Die ULS-Datenerhebung fand mit einem RiCOPTER (Abfluggewicht 25 kg) der Firma Riegl durch die Pilot:innen von Laserdata statt (Abbildung 131, unten links). Als Payload kam das Riegl VUX-SYS zum Einsatz - für die ersten drei Flüge mit einem Riegl VUX-1LR (max. Reichweite 1,540 m; Genauigkeit/Präzision 15 mm/10 mm; Scanrate bis zu 820 kHz) (weitere technische Details siehe Riegl, 2020), für die beiden letzten Flüge mit einem Riegl VUX-1LR²² (max. Reichweite 1.845 m; Genauigkeit/Präzision 15 mm/5 mm; Scanrate bis zu 1,500 kHz) ausgestattet (weitere technische Details siehe Riegl, 2022). Zusätzlich zeichnete eine in

Flugrichtung vor den Scanner im Nadir montierte Sony Alpha 6000 Tageslichtkamera Serienbilder mit 24 MP und einer Überlappung von min. 80% in Flugrichtung und 80% seitlich auf, die damit mittels SfM-MVS-Photogrammetrie ausgewertet werden konnten. Die Flughöhe betrug für die Flüge mit dem VUX-1LR ca. 90 m ü.G., für die Flüge mit dem VUX-1LR²² ca. 120 m ü.G.; dies geschah zum einen um der höheren Scanrate des VUX-1LR²² Rechnung zu tragen und eine annähernd ähnliche Punktdichte wie bei den Flügen mit dem VUX-1LR zu erzielen; zum anderen um die Anzahl der Starts und Landungen bei den Flügen aus dem unübersichtlichen zentralen Teil des Arbeitsgebiets so gering wie möglich zu halten. Die Georeferenzierung fand direkt statt, sprich nur mit der am RiCOPTER / dem VUX-SYS eingebauten IMU-/GNSS-Sensorik (APX-20 UAV, Riegl, 2022). Aufgrund der hohen Genauigkeit und Präzision des VUX-SYS, wurden keine zusätzlichen Passpunkte am Boden für die Georeferenzierung verwendet.

Abbildung 131 Eindrücke von den ULS-Befliegungen im MEZG-Rindbach – Drohnenstart zur Befliegung von Gebiet A am 28.3.2024 (oben links); Drohnenlandung am 15.05.2024 nach Befliegung von Gebiet C (oben rechts); Startvorbereitungen am 28.3.2024 (unten links); Blick vom Startpunkt der abgebrochenen Befliegung des Gebiets D am 13.11.2024 (unten rechts)



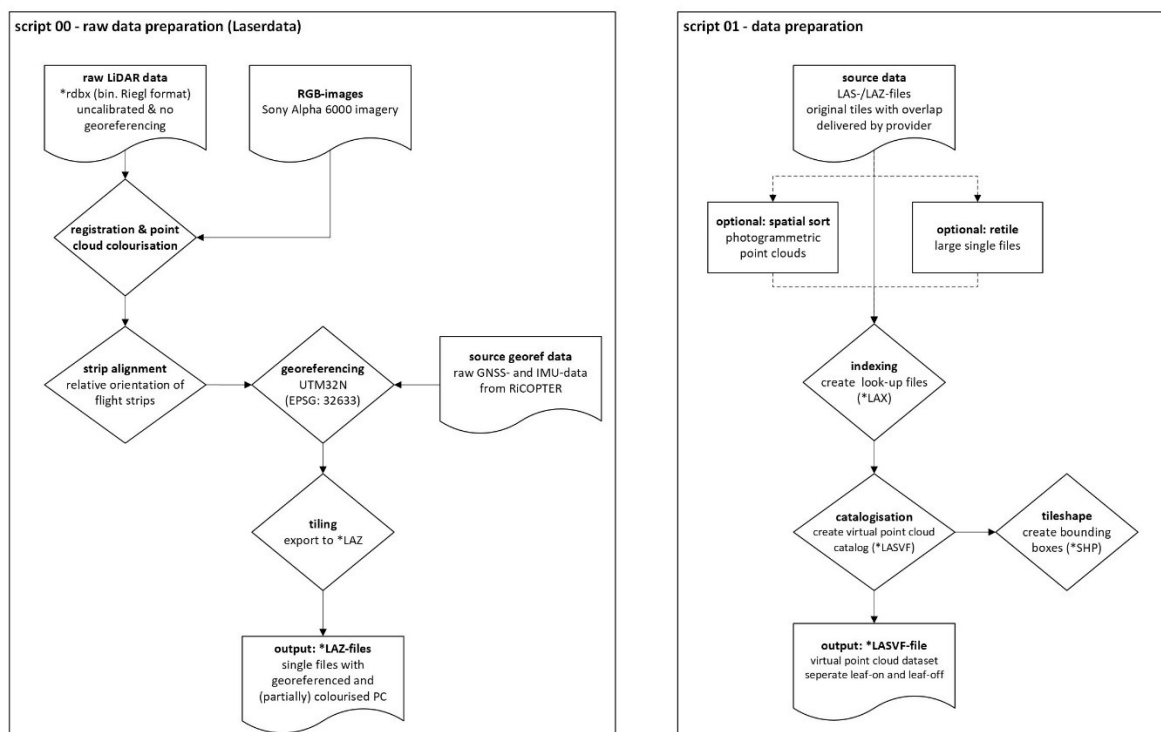
Prozessierung und Filterung von ULS, ALS & UAS-P Daten

Zur Prozessierung und Auswertung der Punktwolken-Daten, wurde die von der Firma Laserdata vertriebene Software LIS Pro 3D verwendet (Riegl et al., 2014). Diese ist in der open-source GIS-Software SAGA (System for Automated Geoscientific Analyses) implementiert und damit voll skripting-fähig, modular aufgebaut und auf die Verarbeitung großer (LiDAR-) Punktwolkendatensätze ausgelegt (Laserdata, 2025). LIS Pro 3D wird seit mehreren Jahren schon am BFW eingesetzt - damit waren eine aktuelle Lizenz zur Verwendung der Software, sowie entsprechendes Wissen zum Umgang damit bereits zu Beginn des Projekts MEZG-Rindbach vorhanden. Des Weiteren profitierten die Autor:innen dieses Berichts von dem

exzellenten Support, sowie den umfangreichen Tutorials und Toolchains, die für die Auswertung von ULS-Daten von Laserdata zur Verfügung gestellt wurden.

In einem ersten Schritt wurden die mit dem RiCOPTER gesammelten Rohdaten (LiDAR-Punktwolken, Kamerabilder und GNSS-/IMU-Daten) von der Firma Laserdata vorprozessiert. Dazu fand eine Registrierung der Punktwolken aus unterschiedlichen Flugstreifen statt. Anschließend wurden die Punktwolken mittels der mit der Tageslichtkamera aufgenommenen Bilder koloriert. Die Punktwolken wurden dann im Koordinatenreferenzsystem UTM32N (EPSG: 32633) georeferenziert, im branchenüblichen Punktwolken-Format *LAS (v1.4), bzw. der komprimierten Form *LAZ ausgespielt, und dem BFW zusammen mit den Bildern der Tageslichtkamera, sowie den GNSS-Koordinaten und IMU-Lageinformation (roll/pitch/yaw) der Bildmittelpunkte übergeben. Diese Arbeitsschritte sind in Abbildung 132 (links) dargestellt.

Abbildung 132 Flowchart des Arbeitsschrittes ‚Datenaufbereitung‘ für a) die Aufbereitung der Rohdaten aus den binären Riegl-Messdaten, Bildern der UAS-Tageslichtkamera und den IMU- und GNSS-Rohdaten zur Bereitstellung der LAZ-files für die weitere Bearbeitung (durchgeführt von der Firma Laserdata) (links); b) die Vorprozessierung der LAZ-files am BFW durch räumliche Indizierung, Katalogisierung und Segmentierung in 50x50 m Bearbeitungseinheiten (rechts)



Am BFW wurden sämtliche Punktwolken- und Bilddaten vorprozessiert und für die weitere Bearbeitung virtuell katalogisiert: i) Die erhaltenen ULS-Daten wurden in einem ersten Arbeitsschritt in LIS Pro 3D (script 01) vorprozessiert (Abbildung 132, rechts). Dazu wurden die LAZ-files durch eine räumliche Indizierung, Katalogisierung und Segmentierung in 50x50 m große Bearbeitungseinheiten für die folgenden Schritte in der Prozessierung vorbereitet. ii) Die Bilddaten wurden mit der SfM-MVS-Photogrammetrie Software Agisoft Metashape (Agisoft, 2025) prozessiert und daraus georeferenzierte dichte Punktwolken im LAZ-Format, sowie Digitale Oberflächenmodelle (DOM) und Orthophotos ausgespielt. Da die mittels UAS-P erstellten Punktwolken, anders als die ULS-Daten, inhärent räumlich inkohärent sind und als ein großes LAZ-file abgespeichert wurden, wurden in diesem ersten Prozessierungsschritt noch eine räumliche Sortierung (engl. spatial sort), sowie eine Verkleinerung des Inputfiles in leichter verarbeitbare Kacheln (engl. retile) vorgenommen (Abbildung 132, rechts). iii) Am 09.05.2021 wurden im Auftrag der Sektion Oberösterreich der Wildbach- und Lawinenverbauung im MEZG-Rindbach ALS-Daten aufgenommen. Die Rohdaten, sprich Punktwolken, wurden dem BFW für den Vergleich mit den ULS-Daten zur Verfügung gestellt und ebenfalls nach der oben beschriebenen Methode vorprozessiert.

Mit dem Ziel die Stärken und Einschränkungen der verschiedenen Fernerkundungsmethoden zur Erhebung von schutzwaldrelevanten Attributdaten in lawinengefährdeten Waldgebieten zu untersuchen, wurden sechs 50x50 m große, für das Untersuchungsgebiet repräsentative Bereiche, mit einem kartierten SPZ in der Mitte, ausgewählt (engl. pilot subsets). Diese wurden so ausgesucht, dass dort eine Kombination der folgenden Faktoren anzutreffen waren: i) verschiedene Bestandesstrukturen (überwiegend Laubwald – SPZ 32 & 25; überwiegend Nadelwald – SPZ 64; Mischwald – SPZ 62, 35 & 28); ii) geringe (SPZ 62 & 35), mittlere (28 & 25) und hohe Stammzahlen (SPZ 64); verschiedene Belaubungssituationen (leaf-on – SPZ 35 & 32; leaf-off – SPZ 62, 28 & 25); mehrschichtige Bestände mit einem hohen Anteil an Jungwuchs (SPZ 62 & 35) und einschichtige Bestände mit wenig Jungwuchs (SPZ 32 & 25) (Abbildung 133 bzw. Abbildung 134). Ein Vergleich der vertikalen Verteilung der mittels der mit ULS, ALS und UAS-P erstellten Punktwolken, sowie eine Analyse der ULS-Punktwolken unter verschiedenen Bestandesbedingungen, erfolgte, indem 5 m breite und 20 m lange Profilschnitte durch die pilot subsets gelegt wurden, die Punktwolken entlang dieser extrahiert und nach ihrer Höhe über Grund geplottet wurden. Auch wurden in diesen pilot subsets beispielhaft Punktwolken-Prozessierungsmethoden angewendet und analysiert, die nicht auf die gesamte Fläche ausrollbar waren (Beschreibung siehe folgender Abschnitt).

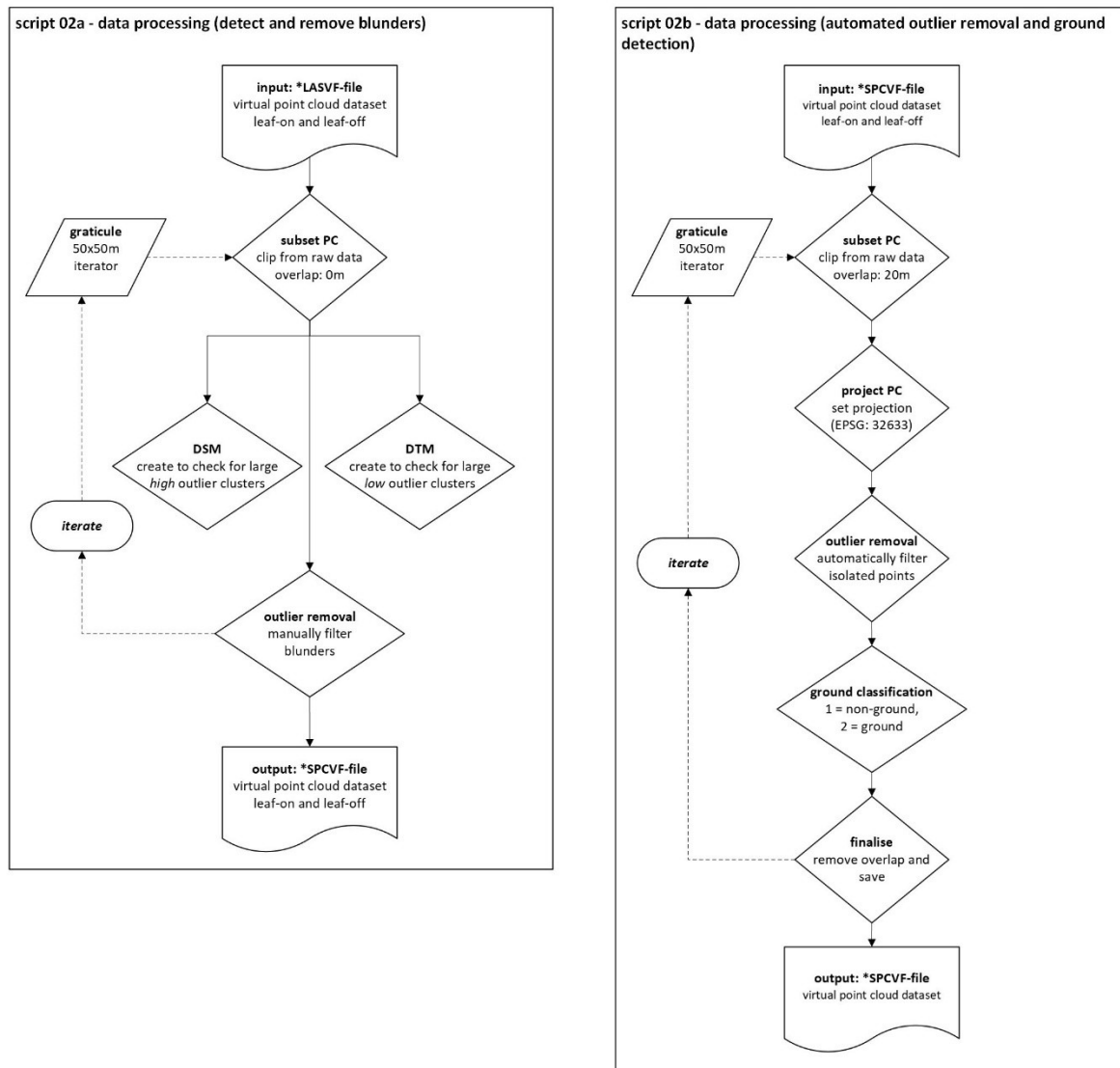
Abbildung 133 Übersicht der pilot subsets im MEZG Rindbach mit der 50x50 m großen Begrenzung der subsets (rotes Polygon) und der Nummer des SPZ - dargestellt sind jeweils die Auszüge von den UAS SfM-MVS Orthophotos, welche zeitgleich mit den ULS-Daten aufgenommen wurden.



Abbildung 134 Eindrücke vor-Ort im Nahbereich des SPZ während der forstlichen
Aufnahmen im Sommer 2024 – Nummerierung in der gleichen Reihenfolge wie Abbildung
133



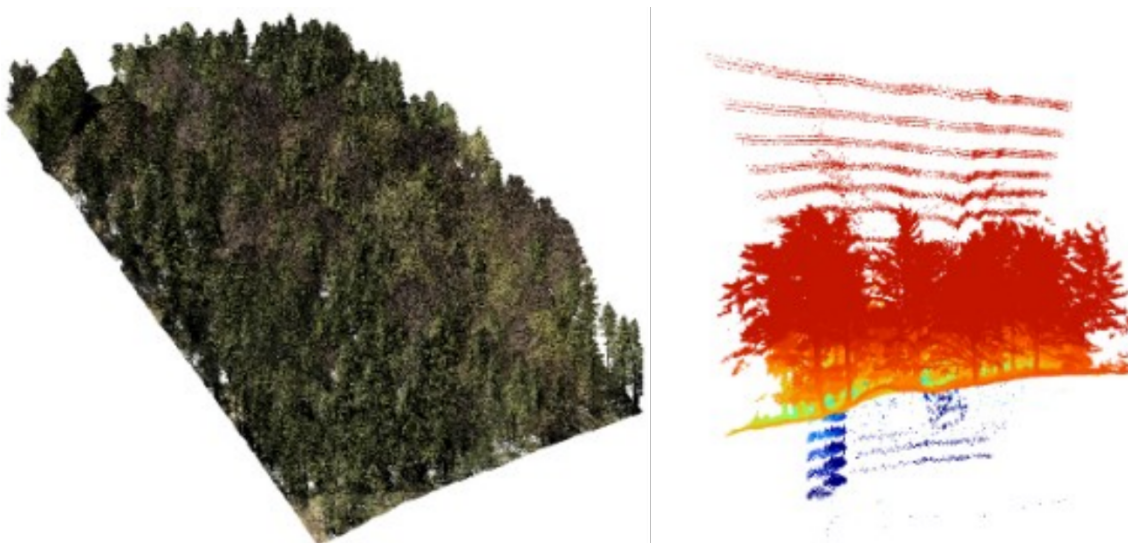
Abbildung 135 Flowchart des Arbeitsschrittes ‚Datenprozessierung‘ für a) die Detektion und (manuelle) Filterung großer Gruppen von Ausreißern (links); b) die automatisierte Detektion und Filterung von Rauschen und Boden-/Nicht-Boden-Klassifikation (rechts)



Durch Scanfehler, Verunreinigungen am Sensor oder fälschliche Zuweisungen bei der Registrierung und/oder Georeferenzierung der ULS-Daten, kann es zu Rauschen, Ausreißern und Artefakten kommen. Ein (extremes) Beispiel ist in Abbildung 136 (rechts) dargestellt. Die nach Höhe über Grund eingefärbte ULS-Punktwolke zeigt Fehlwerte (Ausreißer und Artefakte), sowohl oberhalb in Rot-, als auch unterhalb des gescannten Waldbestandes, in Blautönen. Mit dem Ziel die manuelle Interaktion im Prozessierungsschritt der Filterung dieser Fehlwerte, möglichst gering zu halten, wurden zunächst einzelne, später Kombinationen von den im LIS Pro 3D verfügbaren Filteralgorithmen und Parametereinstellungen derselben, an mehreren für den ULS-Datensatz repräsentativen Ausschnitten aus der Punktwolke

getestet, um eine optimale Kombination zur möglichst automatisierten Beseitigung dieser Artefakte zu finden. Obwohl ein Großteil der Fehlwerte damit gefiltert und die Menge an gelöschten validen Punkten minimiert werden konnte, wurde nach einer Umlegung dieser Filterung auf das gesamte Arbeitsgebiet festgestellt, dass an einzelnen Stellen noch dichte Ausreißercluster (engl. *blunder*) in den Daten vorhanden waren, was teilweise die Durchführung der weiteren Prozessierungsschritte verunmöglichte oder unplausible Resultate erzeugte. Daher wurde ein Skript aufgesetzt, dass zunächst DOM (engl. *Digital Surface Model – DSM*) und DGM (engl. *Digital Terrain Model – DTM*) berechnete, um hohe, respektive niedrige Ausreißercluster identifizieren und im Nachgang manuell löschen zu können (Abbildung 135, links). Um dies für das gesamte Arbeitsgebiet durchzuführen, wurde das Skript iterativ auf das in 50x50 m große Kacheln unterteilte Untersuchungsgebiet parallelisiert angewendet. Im Anschluss wurden die Ergebnisse (DOM, DGM und Punktwolken) aus den einzelnen Kacheln wieder miteinander verschmolzen (Raster), bzw. in einer virtuellen Punktwolken-Datenbank (engl. *Virtual SAGA Point Cloud Dataset - SPCVF*) zusammengeführt. Dies wurde für die *leaf-on* und *leaf-off* Datensätze einzeln durchgeführt.

Abbildung 136 Beispiele für ULS-Punktwolken – RGB-kolorierte Punktwolke eines 50x50 m Ausschnittes eines Mischwaldbestandes im MEZG-Rindbach, aufgenommen am 23.08.2024 (links); nach Höhe über Grund eingefärbte Punktwolke (rot = hoch / blau = niedrig), die massive Scanartefakte und Ausreißer oberhalb und unterhalb der Baumpunkte aufweist (rechts)



Im nächsten Schritt (Abbildung 135, rechts) wurden die um *blunders* bereinigten Punktwolken des gesamten Untersuchungsgebiets wieder iterativ aus der SPCVF-Datenbank mit einem Puffer von 20 m ausgeschnitten, eine geographische Projektion zugewiesen (EPSG: 32633), und eine Serie verschiedener automatisierter Filteralgorithmen auf diese Teilbereiche der Punktwolke (engl. *subsets*) angewendet, um robust die Filterung von Rauschen und Ausreißern durchzuführen. In einem anschließenden Prozessierungsschritt wurde eine Klassifikation der Punktwolke in Boden- und Nicht-Boden vorgenommen. Dies erlaubt eine direkte Ansprache und Analyse der als Bäume klassifizierte Punkte, und eine robuste Erzeugung von DGM (siehe nachfolgender Absatz). Der zur Vermeidung von Randeffekten in diesen Prozessierungsschritten inkludierte Pufferbereich um die *subsets* wurde abschließend wieder herausgeschnitten und die Ergebnisse in eine weitere der SPCVF-Datenbank ausgespielt. Dieser Datensatz diente im Folgenden als Basis für die Berechnung dendrometrischer Parameter.

Berechnung dendrometrischer Parameter aus ULS-Daten

Zur Berechnung dendrometrischer Parameter aus den ULS-Daten, wurden die beiden im Abschnitt ‚Literaturüberblick‘ beschriebenen Methoden top-down und bottom-up

Abbildung 190 im Anhang gibt einen schematischen Überblick der bei der Berechnung dendrometrischer Parameter aus ULS-Daten mittels einem *top-down* Verfahren durchgeführten Arbeitsschritte. Input ist die in der SPCVF-Datenbank gespeicherte Punktwolke, die in den vorhergehenden Schritten gefiltert wurde. Aus dieser werden wiederum zur Unterteilung der Arbeitsschritte, 50x50 m große *subsets* des Arbeitsbereichs ausgeschnitten und aus diesen DOM (Kriterium: Maximalwert in jeder Zelle) und DGM (Kriterium: Boden-Punkt aus vorhergehendem Prozessierungsschritt) mit einer Bodenauflösung von 0,2 m berechnet; beide werden anschließend zu einem den gesamten Arbeitsbereich abdeckenden Raster verschmolzen und abgespeichert. Das DGM wird herangezogen, um die Höhe über Grund (*dz*) eines jeden Punktes zu berechnen und aus diesen ein Vegetationshöhenmodell (VHM) (engl. *Canopy Height Model – CHM*) zu berechnen. Da sich keine nennenswerten künstlichen Strukturen (Brücken, Leitungen, etc.) im Arbeitsgebiet befinden, wurde auf eine weitere (thematische) Klassifizierung der Punktwolke verzichtet. Das VHM wurde zum einen mit den VHM der anderen *subsets* verschmolzen und abgespeichert, zum anderen pro *subset* mit einem Gauß'schen Filter geglättet und für die Identifikation der Einzelbäume im folgenden Schritt herangezogen. Dabei wurden *leaf-on* und *leaf-off* Datensätze gemeinsam prozessiert und dort ein Baum ausgewiesen, wo das geglättete VHM >0,8 m Höhendifferenz zwischen Maximum und (lokalen) Minimum im Raster aufwies. In der Folge wurden

alle zu einem Baum geometrisch dazugehörigen Pixel (sprich Pixel, die unterhalb des (lokalen) Minimums lagen) als Baumkrone abgegrenzt, dessen Umfang räumlich abgegrenzt, der Mittelpunkt bestimmt und die Baumhöhe, der Kronendurchmesser und die Kronenfläche daraus berechnet und abgespeichert. Die berechneten Baumspitzen aller *subsets* wurden ebenfalls verschmolzen und abgespeichert. Da dieser Ansatz nur die Baumkronen und nicht den darunter liegenden Stamm berücksichtigen kann, war keine Ableitung eines BHD möglich; die anderen oben beschriebenen Ziel-Indikatoren (mittlere Bestandeshöhe, Stammzahl und Kronendeckungsgrad) konnten aber mittels *top-down* aus den ULS-Daten bestimmt werden.

In einem ersten Anlauf des *bottom-up* Ansatzes wurde die im LIS Pro 3D (Laserdata, 2025) verfügbare und auch in anderen Studien (z.B. Cai et al., 2024; Kuželka et al., 2020; Brede et al., 2019) verwendete Methodik getestet, mittels der die Teile der ULS-Punktwolke isoliert werden können, die die Stämme abbilden. Diese werden in der Folge extrahiert und geometrische Formen (oftmals Zylinder oder Kreise) mittels *best-fit* eingefügt, um direkt einen BHD zu berechnen und anschließend den Bestand basierend auf dieser Vorausscheidung zu segmentieren. Zur Umsetzung dieses Workflows bedarf es allerdings einer ausreichend hohen Anzahl von ULS-Punkten auf den Stämmen. Eine eingehende Untersuchung in Frage kommender Parameterkombinationen mit diesem Ansatz ergab aber leider, dass die im gegenständlichen Fall vorliegende ULS-Punktwolke auch in laubwalddominierten Bereichen des Untersuchungsgebiets zum *leaf-off* Zeitpunkt aufgrund der nicht durchführbaren Kreuzbefliegung zu wenig Stammtreffer aufwies – daher war auch mit dem *bottom-up* Ansatz keine Ableitung von BDH möglich und eine alternative Prozessierungsmethode für *bottom-up* musste gewählt werden.

Abbildung 191 und Abbildung 192 im Anhang zeigen den anschließend gewählten, schematisierten Ablauf der durchgeführten Arbeitsschritte zur Ableitung dendrometrischer Parameter aus ULS-Daten mittels alternativem *bottom-up* Ansatz. Dazu wurden zunächst (*step 1*) 50x50 m große *subsets* aus der SPCVF-Datenbank iterativ für das gesamte Gebiet ausgeschnitten und die *last returns*¹ des LiDAR-Signals kalkuliert. Danach wurde die Punktwolke

¹ Last returns sind die pro ausgesendetem Laserpulse als letztes, valides Signal erhaltene geometrische Position; die Filterung nach diesem Kriterium erhöht die Wahrscheinlichkeit von Stammtreffern (Riegl, 2022).

gefiltert nach last returns, sowie einer hohen *reflectance*²(> -7), und einer niedrigen *deviation*³(< 10). Anschließend wurden alle Punkte mit einer dz-Höhe von 1-5 m aus der Punktwolke herausgeschnitten und dichte-basiert geclustert. Hintergrund dieses Arbeitsschrittes war die Annahme, dass die Stämme zwar nicht mit ausreichend ULS-Punkten abgebildet waren, um sie vollständig geometrisch zu identifizieren, die Punktwolken aber im Gegensatz zu anderen ULS-Treffern in diesem Höhenband (z.B. Unterwuchs oder Äste), relativ dicht um die Stämme gruppiert und damit geometrisch als Cluster abbildbar waren. Die erstellten Cluster wurden nach ihrer Linearität (0,6 – 1) und Eigenvektor Vertikalität in der Hochachse (60 – 90°) gefiltert und in einer virtuellen SPCVF-Datenbank abgespeichert. Abschließend wurde der tiefst gelegene Punkt innerhalb eines jeden Clusters berechnet und als (potenzieller) Stammursprung (engl. *stem positions*) in den nächsten Berechnungsschritt überführt. In diesem (*step 2*) wurden nach einer nochmaligen iterativen Bildung von *subsets*, eine Segmentierung der gesamten Punktwolke vorgenommen. Diese fand in erster Linie auf Basis der im *step 1* identifizierten *stem positions* statt und wurde um eine in regelmäßigen Abständen eingefügte Anzahl künstlicher Stamm-Ursprungspunkte ergänzt, um im ersten Schritt nicht detektierte Baumindividuum zu inkludieren. Nach der Segmentierung wurde die Punktwolke wieder in einer neuen SPCVF-Datenbank eingespielt, wo jeder Baum eine ID bekam. Die Position der Bäume wurde optional um einen allometrisch bestimmten BHD ergänzt (Höhe / 100), der als Platzhalter für den letzten Prozessierungsschritt notwendig war, aber nicht in die Auswertung im Rahmen dieser Studie mit einbezogen wurde. Alle Baumpositionen aus den *subsets* wurden abschließend verschmolzen und abgespeichert. Im letzten Prozessierungsschritt (*step 3*), wurden pro *subset* iterativ die dendrometrischen Parameter (mittlere Bestandeshöhe, Stammzahl und Kronendurchmesser) errechnet und die Resultate in verschiedenen, die Baumgeometrie beschreibenden Geodaten (engl. *pipes & skeletons*) (Bremer et al., 2018; Verroust & Lazarus, 2000), sowie die mit den dendrometrischen Parametern versehenen Punktwolke abgespeichert. Leider konnten auch in diesem Schritt aufgrund der fehlenden Stammtreffer keine BDH berechnet werden. Dafür sind aber eine Reihe spezifischer, geometrischer Attribute eines jeden Baumes verfügbar (z.B. Anzahl, Austrittswinkel und Position, sowie modellierte Dicke der Äste, modelliertes Volumen des Stammes und der Äste). Diese wurden beispielhaft für ein pilot subset berechnet und den Ergebnissen beigelegt.

² Riegl-spezifisches Punktwolkenattribut, welches das kalibrierte Verhältnis zwischen der ausgesandten und empfangenen Laserenergie eines jeden Pulses beschreibt – eine hohe *reflectance* ist von hellen, homogenen Objekten zu erwarten (Riegl, 2022).

³ Riegl-spezifisches Punktwolkenattribut, dass die Streubreite des empfangenen LiDAR-Signals in der zeitlichen Dimension angibt; eine geringe *deviation* ist von ebenen, soliden Objekten zu erwarten (Riegl, 2022).

Methoden TEIL 3: Erhebung und Modellierung der aktuellen bzw. potenziellen Lawinensituation

Historische Ereignisse

Wie bei technischen Berichten für gutachterliche Zwecke üblich, wurde zunächst versucht, möglichst viele historische Ereignisse im MEZG-Rindbach aus bestehenden Katastern, Datenbanken, Chroniken u. Ä. zu erheben und zusammenfassend darzustellen. Dieser Arbeitsschritt bildet in der Regel bereits eine solide Grundlage für Validierungen erstellter Suszeptibilitätskarten, für Modellierungen von Transitgebieten und Auslaufbereichen sowie für Modell-Kalibrierungen.

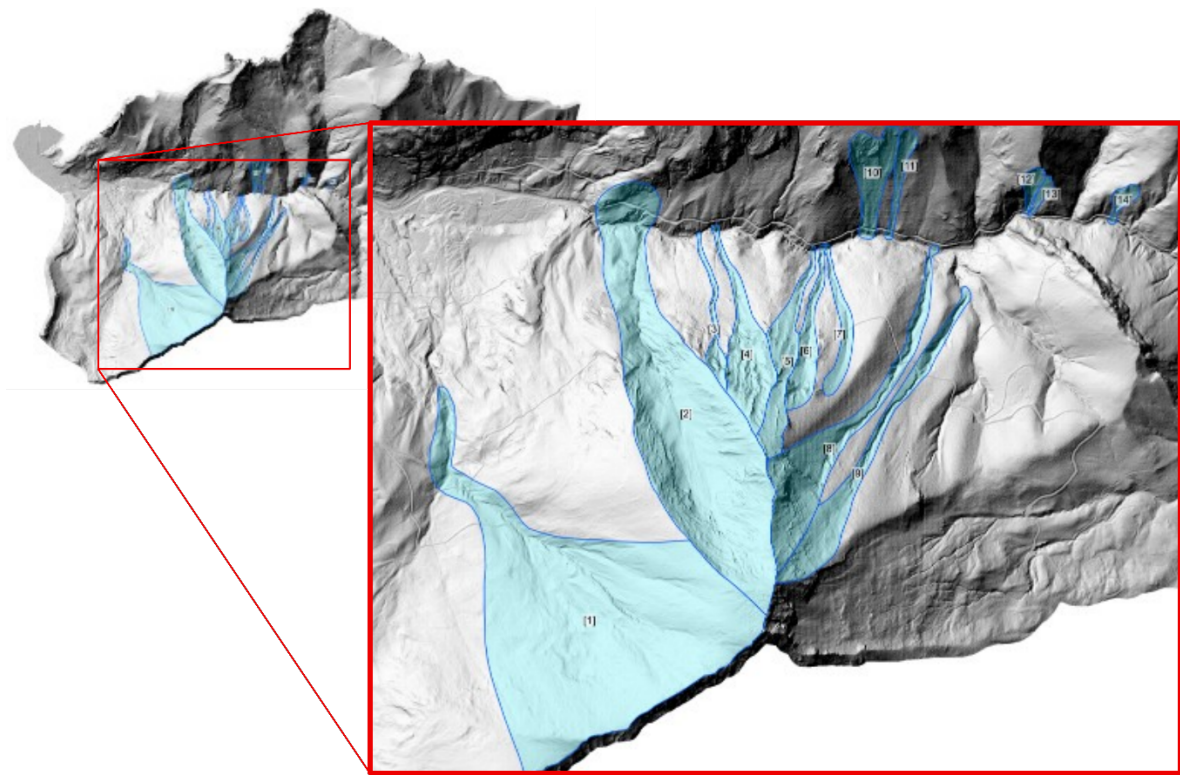
Da es sich beim MEZG-Rindbach überwiegend um unbesiedeltes Gebiet handelt, das zudem nicht durch (alpine) Infrastrukturbetreiber (z.B. Bergbahnen für den Wintertourismus, ÖBB) erschlossen ist, konnten nur wenige historische Informationen gewonnen werden. Hierzu zählen zum einen die offiziellen, verordneten Lawineneinzugsgebiete, wie sie im aktuellen Waldatlas visualisiert (<https://waldatlas.at/>; Thema „Lawineneinzugsgebiete“) und von der zuständigen Stelle des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinenverbauung (WLV) übermittelt wurden, und zum anderen ein historisches Ereignis aus dem Wildbach- und Lawinenkataster (WLK) der WLV, das ebenfalls im Waldatlas zu finden ist (Thema „Historische Schadereignisse“).

Gemäß WLV sind im MEZG-Rindbach folgende Lawineneinzugsgebiete verordnet (Abbildung 137):

- Waltersgrabenlawine [1]
- Häuseleckgrabenlawine [2]
- Hintere Häuseleckriedlgrabenlawine [3]
- Bärngrabenlawine 1 bzw. Bärngrabenlawine [4]
- Eibenberglawine 1 bzw. Vordere Bärnplangrabenlawine [5]
- Eibenberglawine 2 bzw. Mittlere Bärnplangrabenlawine [6]
- Eibenberglawine 3 bzw. Hintere Bärnplangrabenlawine [7]
- Kleiner Bärngraben [8]
- Großer Bärngraben [9]
- Erlakogellawine 1 [10]
- Erlakogellawine 2 [11]
- Erlakogellawine 3 [12]

- Erlakogellawine 4 [13]
- Kabertennspitzllawine [14]

Abbildung 137 Überblick des MEZG-Rindbach mit den 14 gemäß WLV verordneten Lawineneinzugsgebieten (blaue Polygone) sowie entsprechender Detail-Ansicht



Von den 14 verordneten Lawineneinzugsgebieten liegen die meisten am Nordhang des MEZG-Rindbach, d.h. fünf Lawinenzüge befinden sich am orographisch rechten Südhang, neun am orographisch linken Nordhang. Die Hälfte der Einzugsgebiete (7) liegt innerhalb des für die terrestrischen Erhebungen festgelegten Teileinzugsgebietes 1.4, was die Eignung dieser Auswahl für den gegebenen Zweck bestätigt.

Historische Lawinenereignisse sind im MEZG-Rindbach aufgrund des geringen Schadenpotenzials und der Lage außerhalb des raumrelevanten Bereichs kaum dokumentiert. Das einzige im WLK dokumentierte historische Ereignis ereignete sich am 26. Februar 2009 im Häuseleckgraben (Abbildung 138). Die zuständige WLV-Stelle beschrieb die Lawine als „stiebend, geringer Fließanteil (Staublawine im engeren Sinn)“. Es handelte sich um eine Spontanlawine im unmittelbaren Zusammenhang mit einer Niederschlagsperiode. Der Anbruch

erfolgte innerhalb der Schneedecke, der Abgang verlief runsenförmig. Die Ablagerung bestand aus verunreinigtem, gemischtem Material mit groben Schneebestandteilen ($>0,3$ m).

Abbildung 138 Auszug aus dem Waldatlas (waldatlas.at, Thema „Historische Schadereignisse“) mit dem einzigen archivierten Lawinenereignis (weißer Pfeil/Punkt) im Häuseleckgraben (Bildquelle: waldatlas.at)



Bei den zuständigen Stellen der Alpinpolizei, der Landespolizeidirektion, der Bergrettung, dem Ortschronisten sowie den Lawinenkommissionen der Gemeinde konnten keine weiteren Archive mit historischen Lawinenereignissen ermittelt werden.

Identifikation von Flächen mit erhöhter Suszeptibilität für das Anbrechen von Lawinen

Es existieren verschiedene Verfahren zur automatisierten Detektion von PRAs für definierte Regionen oder Einzugsgebiete (z.B. Issler et al., 2023; Duvillier et al., 2023; Maggioni & Gruber, 2003). Obwohl diese Methoden effizient sind, erfordern sie meist Anpassungen an re-

gionale Gegebenheiten. Im vorliegenden Projekt wurden daher alternative Ansätze gewählt, um neben der notwendigen Anpassung auch einen methodischen Vergleich zu ermöglichen. Zur Identifikation lawinengefährdeter Flächen wurden vier verschiedene Suszeptibilitätskarten erstellt und gegenübergestellt, die potenzielle Anbruchgebiete im gesamten MEZG Rindbach unterschiedlich abbilden:

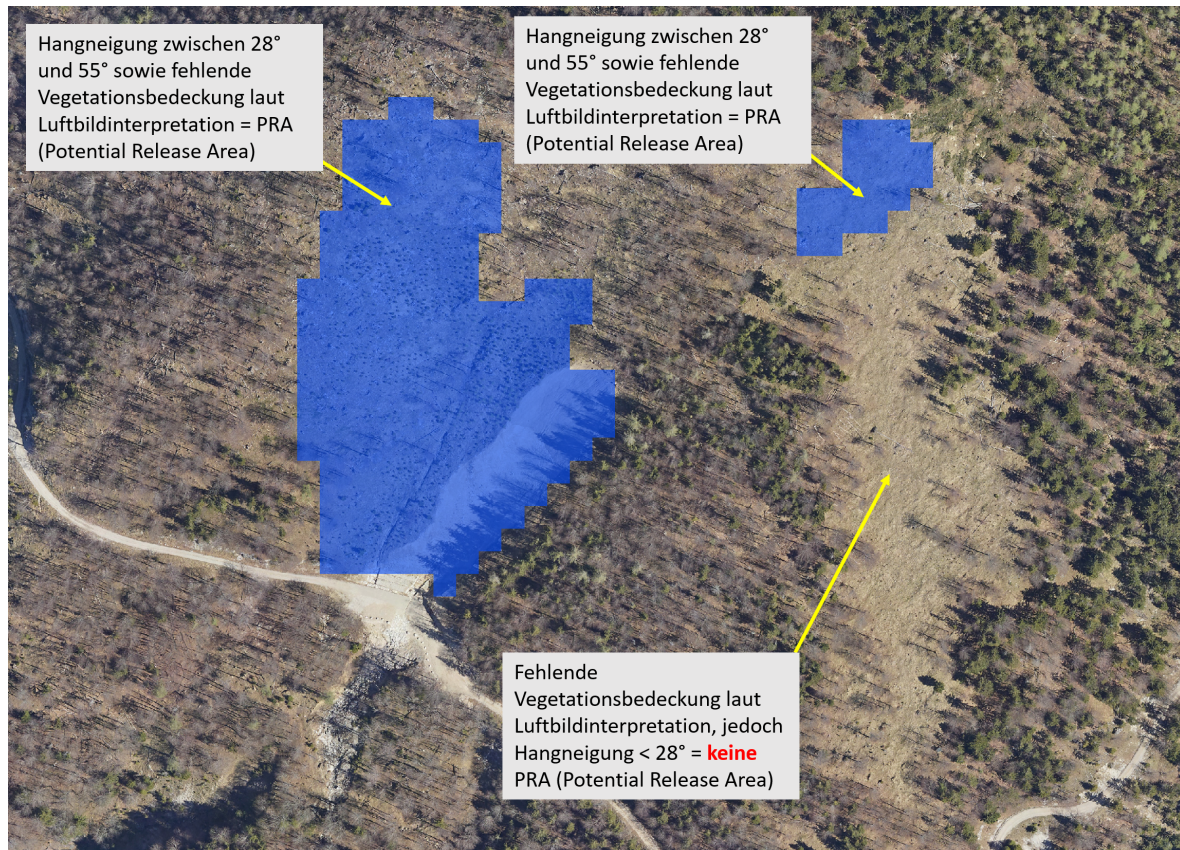
- Gutachterlich
- Basierend auf dem Projekt „GRAVIPROFOR“ (Perzl & Huber, 2014)
- Kombination aus nDOM und Richtwerten aus NaiS (Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald; Frehner et al., 2005)
- Basierend auf Modellierungen der automatischen Geländeklassifizierung nach der Avalanche Terrain Exposure Scale (autoATES)
- Avalanche Terrain Exposure Scale (autoATES)

Variante A: Gutachterlich (mit Berücksichtigung von Hangneigung, Geländeform und Wald)

Der gutachterliche Ansatz basiert auf der detaillierten Auswertung des 2021 im Auftrag der WLW im gegenständlichen Projekt erstellten Orthophotos (0,10 m Auflösung) und dem Verschneiden mit einer Hangneigungskarte. Potenzielle Anbruchflächen wurden anhand von Waldstrukturen und Hangneigung (28°–55°, Praxisleitfaden für Lawinsimulationen in der WLW v1.4; Tollinger et al., 2023) identifiziert. Flächen mit Dickungen oder älteren Beständen wurden als anbruchverhindernd eingestuft, ebenso Laubwald mit ausreichender Stammzahl. Nicht als potenzielle Anbruchgebiete klassifiziert wurden aufgeforstete Flächen, geräumte Windwurfflächen, konkave Geländeformen und Lawinenschneisen (Abbildung 139).

Besondere Merkmale dieses Ansatzes sind zum einen die Berücksichtigung der Schutzwirkung des Waldes gegenüber Lawinenanbrüchen und zum anderen der Verzicht auf die Einbeziehung von (Bemessungs-)Schneehöhen, die in den nachfolgend beschriebenen Ansätzen berücksichtigt werden und einen wesentlichen Einfluss auf die Lawinenentstehung haben.

Abbildung 139 Vergleich von Flächen mit kritischer Hangneigung und als unzureichend eingestufter Waldbedeckung (PRAs) sowie Flächen ohne Wald, aber mit zu flacher Hangneigung (keine PRAs)



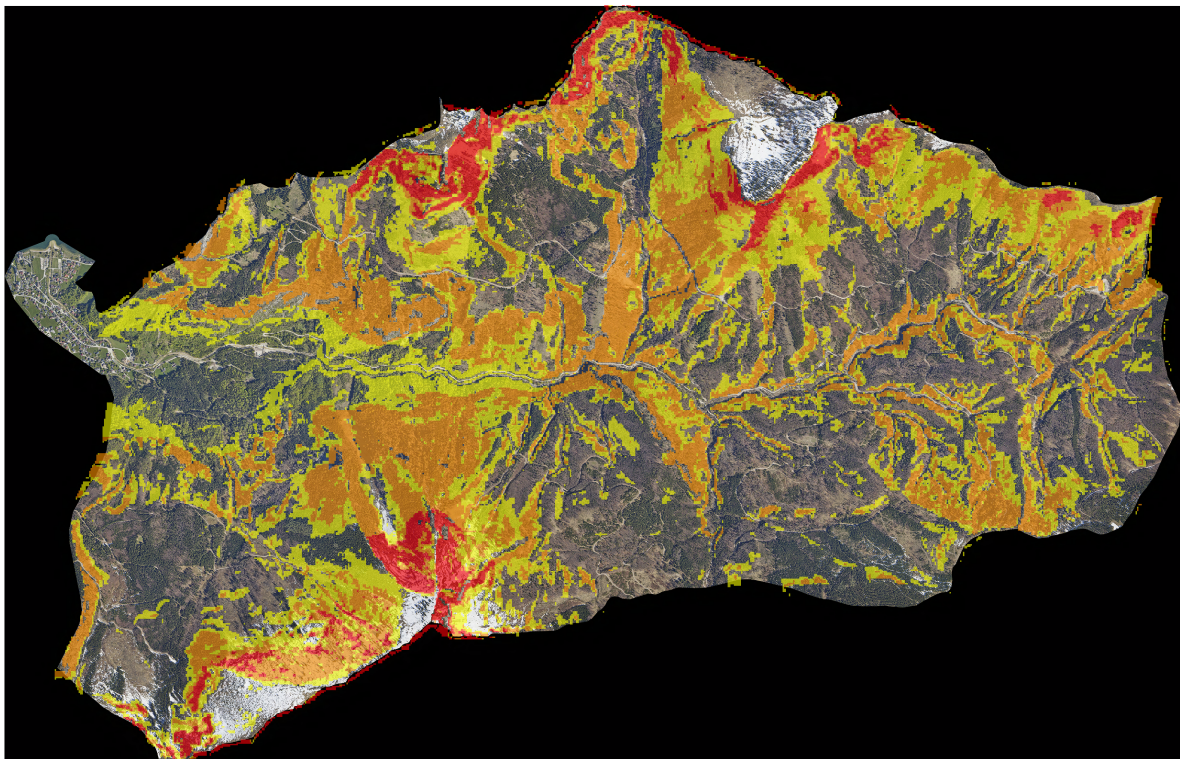
Variante B: Basierend auf dem Projekt „GRAVIPROFOR“ (mit Berücksichtigung von Hangneigung, Geländeform und Schneehöhen; ohne Berücksichtigung von Wald)

Im Projekt „GRAVIPROFOR“ (Perzl & Huber, 2014) wurde für Waldflächen mit direkter Objektschutzfunktion das Anbruchpotenzial („BAIS“ – Basic Avalanche Initiation Susceptibility) ermittelt. Die ausgeschiedenen Dispositionsklassen basieren auf der Hangneigung und der mittleren maximalen Schneehöhe und unterscheiden „geringes“ (Klasse 1), „mittleres“ (Klasse 2) und „großes“ (Klasse 3) Anbruchpotenzial. Für das Projekt MEZG-Rindbach wurden drei PRA-Layer erzeugt (Abbildung 140):

- Klasse 3 (großes Anbruchpotenzial),
- Klasse 3 + 2 (großes und mittleres Anbruchpotenzial)
- Klasse 3 + 2 + 1 (großes, mittleres und geringes Anbruchpotenzial)

Diese Methode wurde österreichweit ebenfalls für die räumliche Modellierung von Wäldern mit direkter Objektschutzfunktion zur Erstellung der Hinweiskarte Schutzwald in Österreich angewendet (Starsich & Perzl, 2022). Die Klassifizierung basiert auf einer ordinalen Einstufung des Anbruchpotenzials, wobei Hangneigung, Hanglänge, Bodenrauigkeit und Bemessungsschneehöhe berücksichtigt werden, nicht jedoch Wald oder Schutzbauten.

Abbildung 140 Lawinenanbruchpotenzial im MEZG-Rindbach basierend auf dem Projekt „GRAVIPROFOR“ (Perzl & Huber, 2014) – Anbruch-Klassen 1 = gelb, 2 = orange, 3 = rot



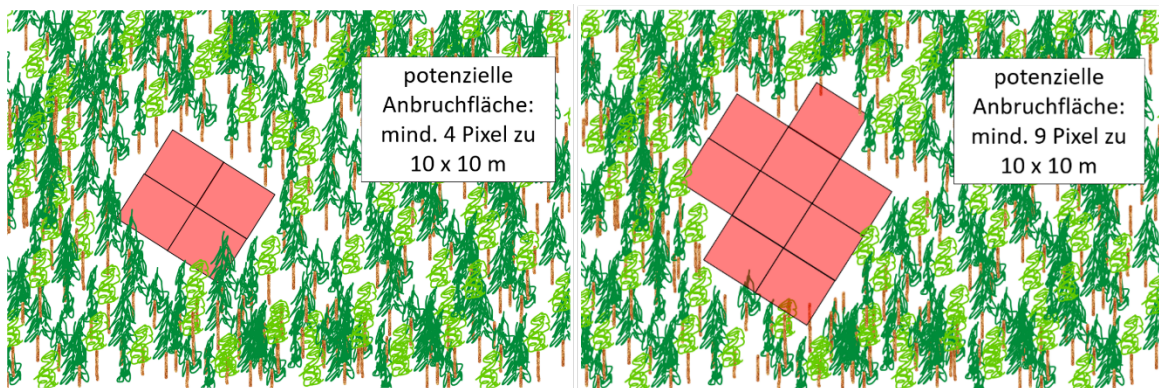
Variante C: Kombination aus nDOM und Richtwerten aus NaiS (mit Berücksichtigung Hangneigung und Wald)

Zur Identifikation von PRAs wurde im nDOM ein Schwellenwert von 2 m festgelegt, um bewaldete und „anbruchhemmende“ Flächen (Höhenunterschied > 2 m) von unbewaldeten oder gering bewachsenen Flächen (≤ 2 m) zu unterscheiden, die als potenzielle Anbruchgebiete gelten können (Perzl et al., 2022). Das nDOM wurde zunächst auf Pixel mit Differenzen ≤ 2 m gefiltert und anschließend auf eine Rasterauflösung von 10×10 m resampelt. Im GIS wurden zusammenhängende Flächen aggregiert, um Mindestgrößen von Waldlücken, in denen potenzielle Lawinen anbrechen können, entsprechend der Schweizer Schutzwaldmanagement-Richtlinie NaiS (Frehner et al., 2005) zu bestimmen:

- Lückenlänge in Falllinie: 30 m bei Hangneigung $> 45^\circ$, 60 m bei Hangneigung $> 30^\circ$
- Maximale Lückenbreite: 15 m

Dies entspricht Mindestflächen zwischen 450 m^2 ($30 \times 15 \text{ m}$) und 900 m^2 ($60 \times 15 \text{ m}$). Aufgrund der Rasterauflösung wurden als konservative Szenarien Flächen mit mindestens 4 (ca. 400 m^2) bzw. 9 (ca. 900 m^2) zusammenhängenden Pixeln berücksichtigt; kleinere Flächen wurden ausgeschlossen. Abschließend erfolgte eine Verschneidung mit einem Layer für kritische Hangneigungen (28° – 55° , Tollinger et al., 2023). Somit wurden potenzielle Lawinenanbruchgebiete als zusammenhängende, unbewaldete oder gering bewachsene Flächen mit Vegetationshöhe $\leq 2 \text{ m}$, einer Mindestfläche von 400 m^2 bzw. 900 m^2 und einer Hangneigung von 28° – 55° definiert. Für das Untersuchungsgebiet MEZG-Rindbach entstanden auf dieser Basis zwei alternative PRA-Layer (Abbildung 141).

Abbildung 141 Schema zur Ermittlung der zwei Layer potenzieller Anbruchgebiete gemäß Variante C. Dabei gelten als Kriterien eine minimale zusammenhängende Fläche mit Hangneigung zwischen 28° und 55° von mindestens 400 m^2 bzw. 900 m^2 sowie eine Bestandeshöhe von unter 2 m



Variante D: Modellierung nach autoATES (mit Berücksichtigung von Hangneigung, Geländeform und Wald)

Das verwendete Modell zur Identifikation von PRAs orientiert sich am Ansatz von Toft et al. (2024) und Sykes et al. (2024) zur automatisierten Klassifikation von Lawinengelände anhand der Avalanche Terrain Exposure Scale (auto-ATES; Huber et al., 2023). Grundlage bildet das PRA-Modell von Veitinger et al. (2016), welches in späteren Arbeiten (u.a. Toft et al., 2024; Markov et al., 2025) erweitert wurde, um Waldinformationen zu integrieren und die Anwendung auf Eingangsdaten mit geringerer Auflösung (ca. 10 m statt ursprünglich

2 m) zu ermöglichen. Der Algorithmus identifiziert PRAs primär anhand von Geländeeigenschaften, kann jedoch optional weitere Faktoren berücksichtigen. Erforderliche Input-Daten sind ein DGM sowie ein Wald-Informationenlayer, aus denen aller weitere benötigte Layer abgeleitet werden. Die Methode basiert auf fuzzy-Membership-Logik, wobei jede Rasterzelle einen Wert zwischen 0 und 1 erhält, der die Zugehörigkeit zu einem potenziellen Anbruchgebiet – interpretiert als Lawinenanbruchwahrscheinlichkeit – beschreibt (vgl. Veitinger et al., 2016).

Standardmäßig fließen drei Faktoren in die Modellierung ein:

- Hangneigung, da Lawinen in bestimmten Hangneigungsbereichen wahrscheinlicher auftreten;
- Windexposition, um exponierte Rücken (mit geringerer Schneedecke) von Senken oder Mulden (mit höherer Schneeakkumulation) zu unterscheiden. Dabei kann die Windrichtung als Eingangsgröße dienen, im vorliegenden Fall wurden jedoch Standardeinstellungen verwendet;
- Geländeunebenheit/Oberflächenrauigkeit, da eine rauere Oberfläche die Bildung zusammenhängender Schwachschichten in der Schneedecke reduziert und somit die Lawinenbildung beeinflusst. Aufgrund der relativ groben Rasterauflösung (10 × 10 m) wurde dieser Faktor hier nicht berücksichtigt.

Für die Einbeziehung der Schutzwirkung des Waldes wurden zwei Vegetationshöhenmodelle herangezogen, basierend auf LiDAR- und photogrammetrisch-basierten DSM. Das jeweilige VHM wurde durch Subtraktion des DGM vom DSM gewonnen. Als Schwellenwert für Waldfläche wurde eine Bestandeshöhe von 5 m definiert: Zellen mit Werten über 5 m erhielten den Wert 1, darunter 0. Die VHM-Layer wurden auf eine Rasterauflösung von 10 × 10 m aggregiert (gewichteter Mittelwert) und als Überschirmungsgrad für die PRA-Modellierung sowie Lawinensimulationen verwendet. Zur Klassifikation einer Rasterzelle als PRA wurde ein Schwellenwert von 0,3 gewählt, der sich innerhalb der in der Literatur empfohlenen Bandbreite von 0,1 bis 0,5 bewegt (z.B. Huber et al., 2023; Markov et al., 2025).

Drei PRA-Szenarien wurden modelliert:

- Basierend auf DGM ohne Berücksichtigung von Wald;
- Basierend auf DGM mit Berücksichtigung von Wald mittels LiDAR-basiertem Vegetationshöhenmodell (LiDAR-VHM);

- Basierend auf DGM mit Berücksichtigung von Wald mittels photogrammetrisch-basiertem Vegetationshöhenmodell (P-VHM).

Modellierung der aktuellen bzw. potenziellen Lawinensituation

Nachdem Flächen mit erhöhter Suszeptibilität für das Anbrechen von Lawinen mittels verschiedener Ansätze identifiziert wurden, kam zur Beurteilung der potenziellen Lawinensituation im MEZG-Rindbach das Simulations-Tool com4FlowPy (D'Amboise et al., 2022) zum Einsatz. Com4FlowPy ist ein empirisch motiviertes Simulationsprogramm zur Modellierung der Ausbreitung und Intensitäten gravitativer Massenbewegungen. Grundsätzlich verwendet das Modell einen einfachen Reichweitenwinkel-Ansatz (Heim, 1932), kombiniert mit Algorithmen, die die laterale Ausbreitung des Prozesses basierend auf einem DGM simulieren. Com4FlowPy ist gemeinsam mit einer Erweiterung zur Modellierung der potenziellen Bremswirkung von Wald („forest friction“-Extension), welche das Modellverhalten für bewaldete Rasterzellen modifiziert (für Details siehe D'Amboise et al., 2021; Huber et al., 2024) als Modul im Open Avalanche Framework AvaFrame verfügbar (avaframe.org).

Als Eingabedaten dienen ein PRA-Raster sowie ein DGM für Simulationen ohne Waldwirkung. Für Simulationen mit Waldwirkung wird zusätzlich ein Wald-Raster verwendet. Dieses beschreibt sowohl die räumliche Ausdehnung des Waldes als auch den sogenannten Forest Structure Index (FSI). Der FSI ist ein dimensionsloser Waldstrukturindex, bei dem der Wert 1 eine optimale Waldstruktur hinsichtlich der Bremswirkung von Lawinen und der Wert 0 fehlenden Wald darstellt.

Für alle Simulationen sind mindestens vier Modellparameter zu definieren:

- Auslaufwinkel (α): pauschaler Winkel zur Definition der maximalen Auslauflänge (Reichweitenwinkel) als eines der Stoppkriterien von com4FlowPy.
- Exponent (exp): Ausbreitungskoeffizient, der die laterale Ausbreitung beeinflusst und die Konzentration des Massenflusses (Flux) steuert. Eine Erhöhung des Wertes führt zu geringerer Ausbreitung, eine Verringerung zu stärkerer Ausbreitung.
- Flux cutoff (R_{stop}): beeinflusst die laterale Ausbreitung und dient als weiteres Stoppkriterium von com4FlowPy.
- Maximale Energielinienhöhe (z_{lim}^{δ}): begrenzt die kinetische Energie einer gravitativen Massenbewegung und beeinflusst deren Auslauflänge; kann als Geschwindigkeitsgrenze v_{lim} interpretiert werden.

Für Simulationen mit Waldwirkung sind zusätzlich zum FSI drei weitere Parameter festzulegen:

- Maximaler Anstieg von α ($\Delta_{for,max}^\alpha$): maximale Grundreibung (engl. *basal friction*), die zu bewaldeten Zellen hinzugefügt wird.
- Minimaler Anstieg von α ($\Delta_{for,min}^\alpha$): minimale Grundreibung, die zu bewaldeten Zellen hinzugefügt wird.
- Geschwindigkeitsschwellwert (v_{for}^{lim}): Schwellenwert, ab dem der Wald keine bremsende Wirkung mehr auf den simulierten Prozess hat.

Nachdem die definierten PRA-Szenarien verglichen und auf Plausibilität überprüft wurden (siehe Kapitel 3.5.4), wurden für die regionalen Simulationen im MEZG-Rindbach die mit Variante D (PRA-Modellierung nach autoATES) erstellten Szenarien ausgewählt. Betrachtet wurden drei Szenarien: zwei unter Berücksichtigung der Anbruchschutz- und Bremswirkung des Waldes sowie eines ohne Waldeinfluss im Anbruch- und Auslaufbereich. Für jedes Szenario wurden mehrere Modell-Parameterkombinationen in com4FlowPy getestet (Tabelle 36). Der exp -Wert wurde konstant auf 8 gesetzt, während α , z_{lim}^δ sowie in bestimmten Fällen R_{stop} variiert wurden. In Szenarien mit Waldwirkung wurde das entsprechende Wald-Raster in die Simulation integriert (z.B. P-VHM-PRAs kombiniert mit demselben P-VHM-Layer für die Auslaufsimulation in com4FlowPy). Zusätzlich wurden bei Simulationen mit Waldeinfluss zwei Parameter der forest friction-Extension variiert: $\Delta_{for,max}^\alpha$ sowie die Waldübersprungsdistanz (skipForDist). Dagegen blieben $\Delta_{for,min}^\alpha$ sowie v_{for}^{lim} konstant.

Tabelle 36 Getestete Modellparameter-Kombinationen für Lawinensimulationen in com4FlowPy mit (VarX-withFor) und ohne (VarX-noFor) Berücksichtigung der Waldwirkung

Modell-Parameter	Simulationen ohne Wald			Simulationen mit Wald			
	Var1-noFor	Var1-noFor	Var1-noFor	Var1-withFor	Var1-withFor	Var1-withFor	Var1-withFor
α [°]	24	25	26	24	25	26	29
exp [-]	8	8	8	8	8	8	8
z_{lim}^δ [m]	270	215	185	270	215	185	185
R_{stop} [-]	0,001	0,003	0,003	0,001	0,003	0,003	0,003
$\Delta_{for,max}^\alpha$ [°]	/	/	/	23	22	21	21

Modell- Parameter	Simulationen ohne Wald			Simulationen mit Wald			
	Var1- noFor	Var1- noFor	Var1- noFor	Var1- withFor	Var1- withFor	Var1- withFor	Var1- withFor
$\Delta_{for,min}^{\alpha}$ [°]	/	/	/	0	0	0	0
v_{for}^{lim} [m/s]	/	/	/	45	45	45	45
skipForDist [m]	/	/	/	0	0	0	30

Zur weiteren Kalibrierung der Modellparameter in com4FlowPy wurden die Simulationsergebnisse mit dem einzigen im MEZG dokumentierten Lawinenereignis, der Häuseleckgrabenlawine, verglichen, um die potenzielle Lawinensituation im MEZG-Rindbach möglichst realitätsnah abzubilden. Die Prozessfläche dieses Ereignisses wurde auf Grundlage eines Luftbildes aus dem Jahr 2009 rekonstruiert (Abbildung 142).

Abbildung 142 Rekonstruierte Prozessfläche im Auslaufbereich der Häuseleckgrabenlawine auf Grundlage der im Luftbild von 2009 erkennbaren Waldschäden



Ergebnisse und Diskussion

Terrestrische Stichprobenaufnahmen im Schutzwald

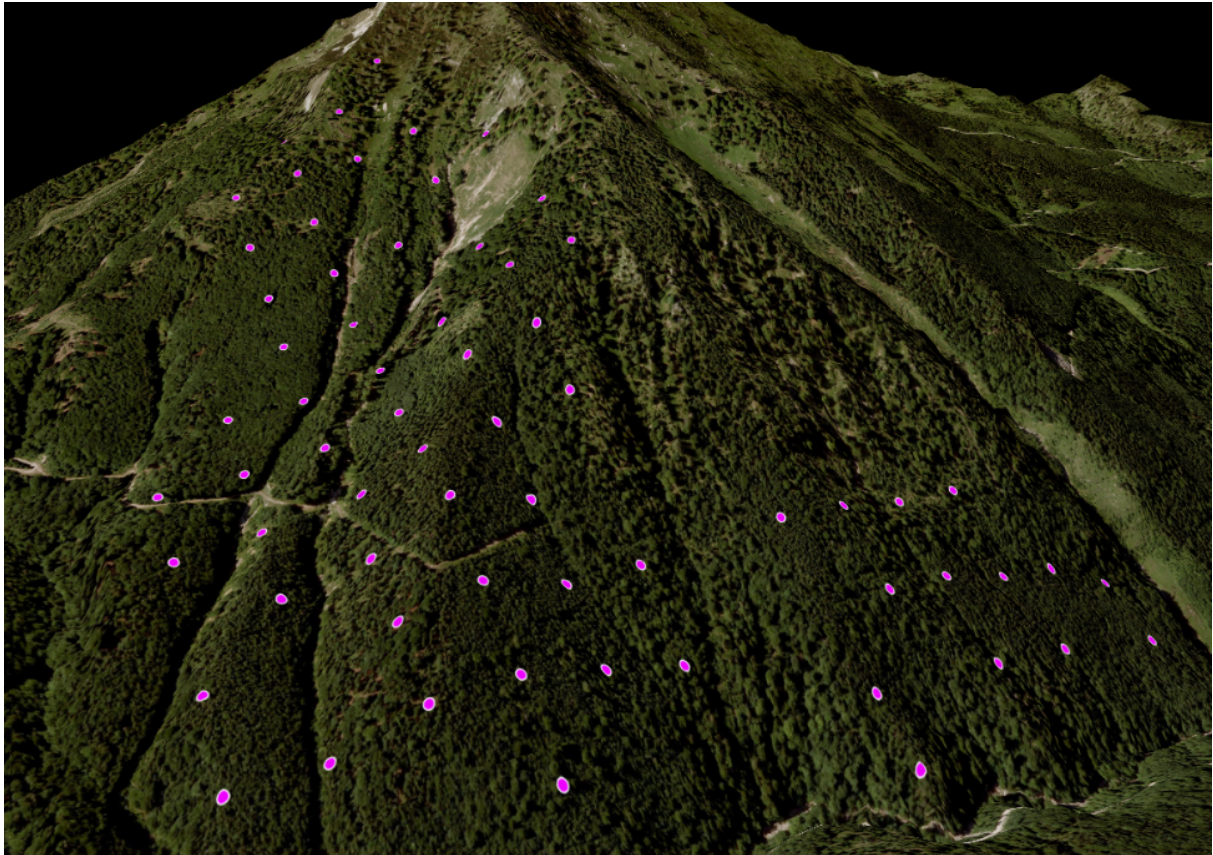
Überblick

Die Geländearbeiten wurden am 09.05.2023 begonnen und dauerten bis 28.07.2023 an. In dieser Zeitspanne wurden die Stichprobenpunkte nach der eingangs beschriebener, standardisierter Methode von einem meist 2-köpfigen Geländetrupp an 33 Geländetagen aufgenommen (Abbildung 143). Einige wenige Stichprobenpunkte konnten aufgrund sehr erschwerter Zugänglichkeit nicht begangen bzw. könnten nur unter erhöhtem persönlichem Risiko begangen werden. Von den vorab 72 ausgewählten Stichprobenpunkten konnten schlussendlich 66 aufgenommen werden (Abbildung 144).

Abbildung 143 (a) Erfassung der Sträucher und Jungpflanzen innerhalb des QSP, (b) Buchenwald innerhalb TEZG 1.4, (c) Nachweis von Schnees Schub, (d) Schutzwirkung gegen Steinschlag



Abbildung 144 3D-Darstellung der 66 vollständig erhobenen Stichprobepunkte im MEZG-Rindbach



Von den 66 Stichprobepunkten befinden sich lediglich 7 (10 %) in einer Lücke (*gap*). Drei dieser Punkte lagen in Lawinenbahnen, zwei in Kronenlücken zwischen Baumholz 1 und Stangenholz, einer in einem Grabeneinhang mit Hinweisen auf frühere Lawinenereignisse, und einer auf einer Windwurffläche. Kein Stichprobepunkt befand sich in einer Blöße.

Bodenbedeckung und Totholz

In mehr als 70 % der Fälle bestand die Bodenbedeckung aus nicht-vegetativer Auflage. Dabei stellten Laubblätter mit 61 % (Abbildung 145) und Nadeln mit 11 % die am häufigsten vorkommenden Bodenbedeckungsmaterialien dar. Unter den vegetativen Bodenbedeckungen waren insbesondere Erdmoose mit einem Anteil von rund 9 % am weitesten verbreitet. Die durchschnittliche Höhe der Bodenvegetation beträgt nur 0,08 m (Abbildung 146).

Abbildung 145 Durchschnittliche Bodenbedeckungswerte nach Bodenvegetations- und Nichtbodenvegetations-komponenten für die Stichprobepunkte, dargestellt mit Standardfehlerbalken

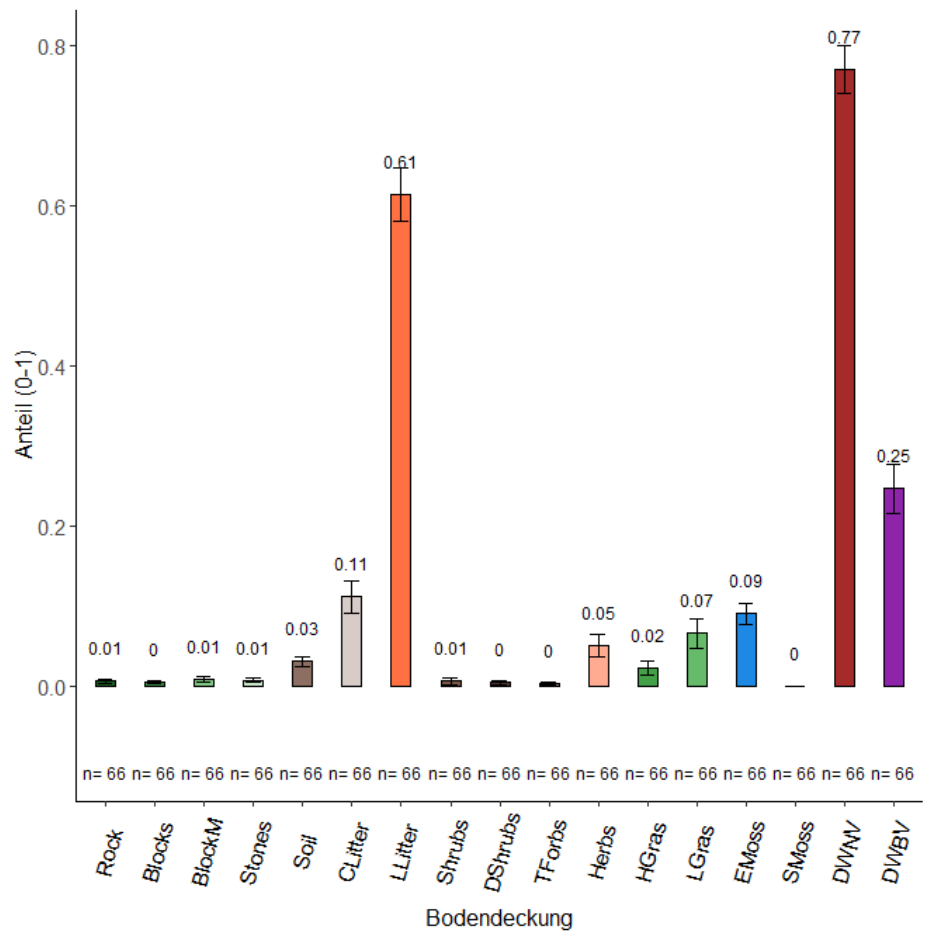
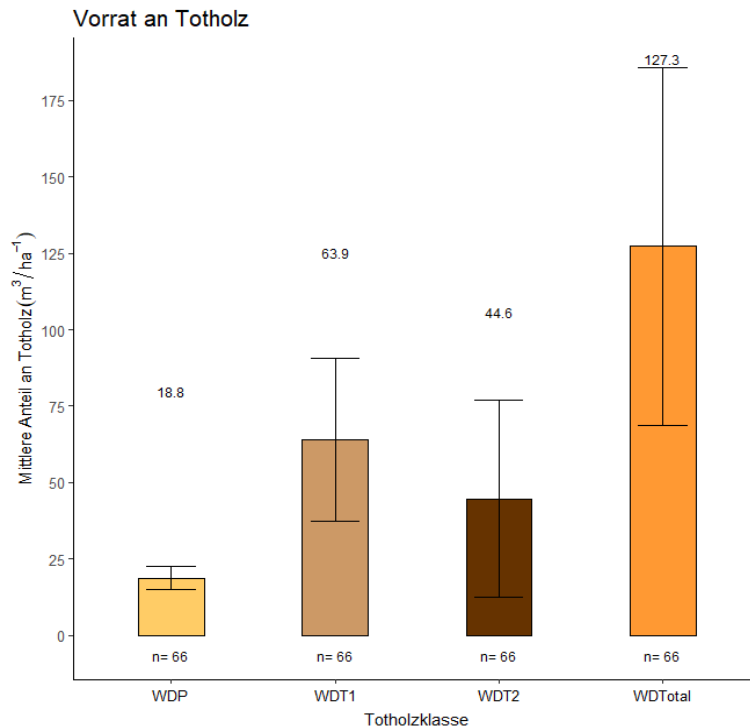


Abbildung 146 Beispielhafte Laubstreuauflage als Teil der Bodenbedeckung im Untersuchungsgebiet TEZG 1.4



In der Untersuchungsfläche beträgt die durchschnittliche Menge an liegendem Totholz 127,3 m³/ha. Der Großteil des Totholzes entfiel auf die Klasse WDT1 mit 63,9 m³/ha, während die geringste Menge in der Klasse WDP mit 18,8 m³/ha verzeichnet wurde (Abbildung 147).

Abbildung 147 Der durchschnittliche Vorrat an liegendem Totholz in den drei Größenklassen WDP ($10 \text{ cm} \leq D \leq 20 \text{ cm}$), WDT1 ($20 \text{ cm} \leq D \leq 40 \text{ cm}$) und WDT2 ($D > 40 \text{ cm}$). Die Zahlen über den Standardfehlerbalken geben die Durchschnittswerte an

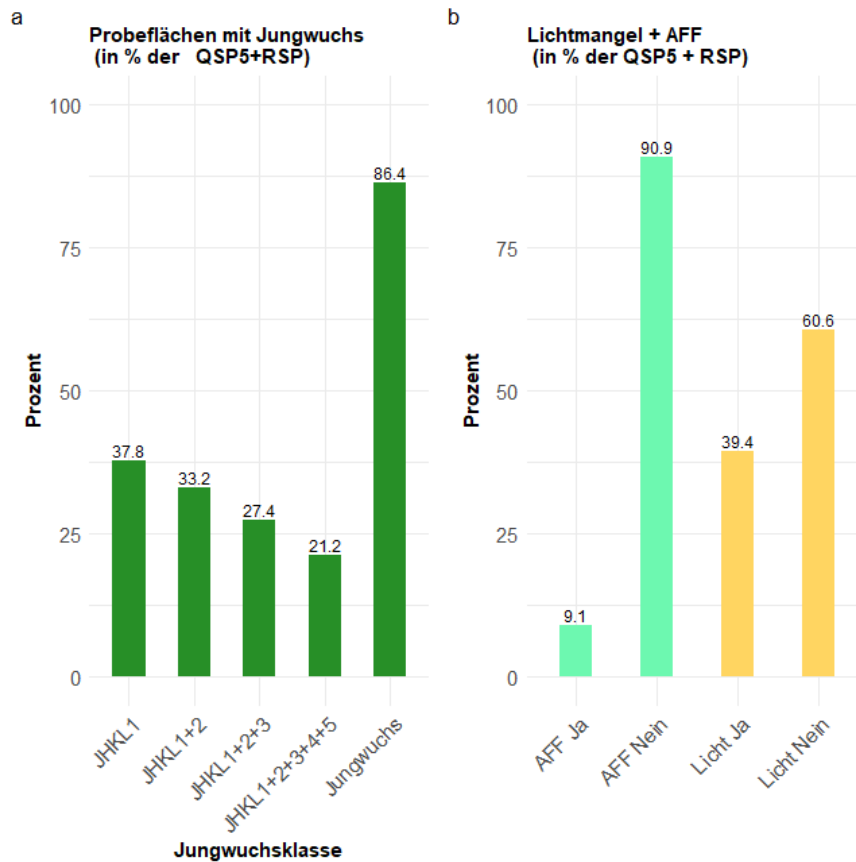


Verjüngungsanalyse

Die Verjüngungsdaten wurden erhoben, um Rückschlüsse auf das zukünftige Regenerationspotenzial der Bestände hinsichtlich Baumartenzusammensetzung und -dichte zu ermöglichen. Zusätzlich wurde der Verbiss durch pflanzenfressende Säugetiere erfasst, da dieser einen erheblichen Einfluss auf die zukünftige Waldverjüngung hat (Motta und Haudemand, 2000). In der gesamten Untersuchungsfläche TEZG 1.4 wiesen lediglich 9,1 % der Stichprobenpunkte Hinweise auf Aufforstung auf, während in 90 % der Flächen eine natürliche Verjüngung beobachtet wurde. In nahezu 40 % aller Stichprobenflächen wurde Lichtmangel als ein Hemmnissfaktor identifiziert. Auf 86 % der Stichprobenflächen trat Jungwuchs auf, wobei der höchste Anteil in Klasse 1 mit 37,8 % verzeichnet wurde (Abbildung 148).

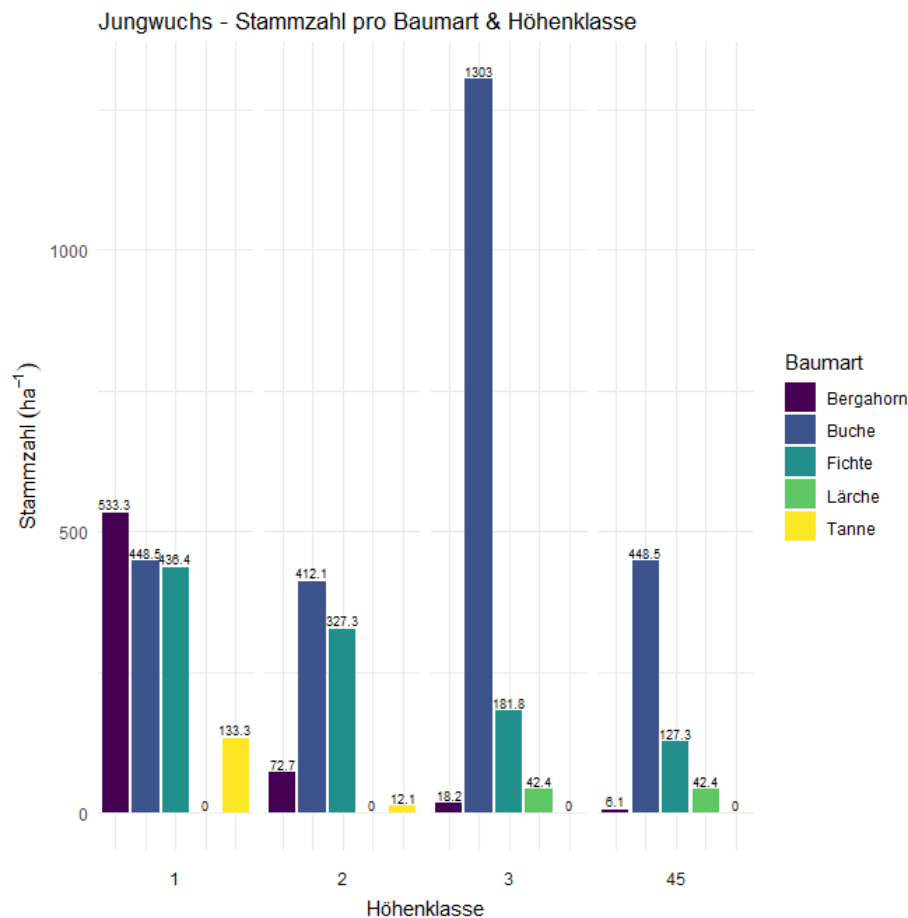
Abbildung 148 Prozentualer Anteil des Jungwuchses pro Höhenklasse (JHKL1, JHKL1+2, JHKL1+2+3, JHKL1+2+3+4+5) und gesamter Jungwuchs (a) sowie Prozentanteil von

Aufforstung und Lichtmangel im TEZG 1.4 (b). Die Zahlen über den Balken geben die Durchschnittswerte an



Die höchste Verjüngungsdichte wurde in der Höhenklasse JHKL3 mit 1.545 Stück/ha beobachtet, wobei 84 % (1.303 Stück/ha) auf *Fagus sylvatica* (Buche) entfielen (Abbildung 149). In der kleinsten Höhenklasse JHKL1 war *Acer pseudoplatanus* (Bergahorn) mit 533 Stück/ha die am häufigsten vertretene Baumart, während *Abies alba* (Weißtanne) mit 133 Stück/ha am seltensten war. In der darauffolgenden Höhenklasse JHKL2 war die Buche erneut am häufigsten vertreten (412 Stück/ha) und blieb auch in den weiteren Höhenklassen JHKL3 sowie JHKL4/5 die dominante Art. Der Bergahorn zeigte hingegen einen starken Rückgang um 86 % und machte in den höchsten Verjüngungsklassen (4+5) weniger als 1 % der Individuen aus.

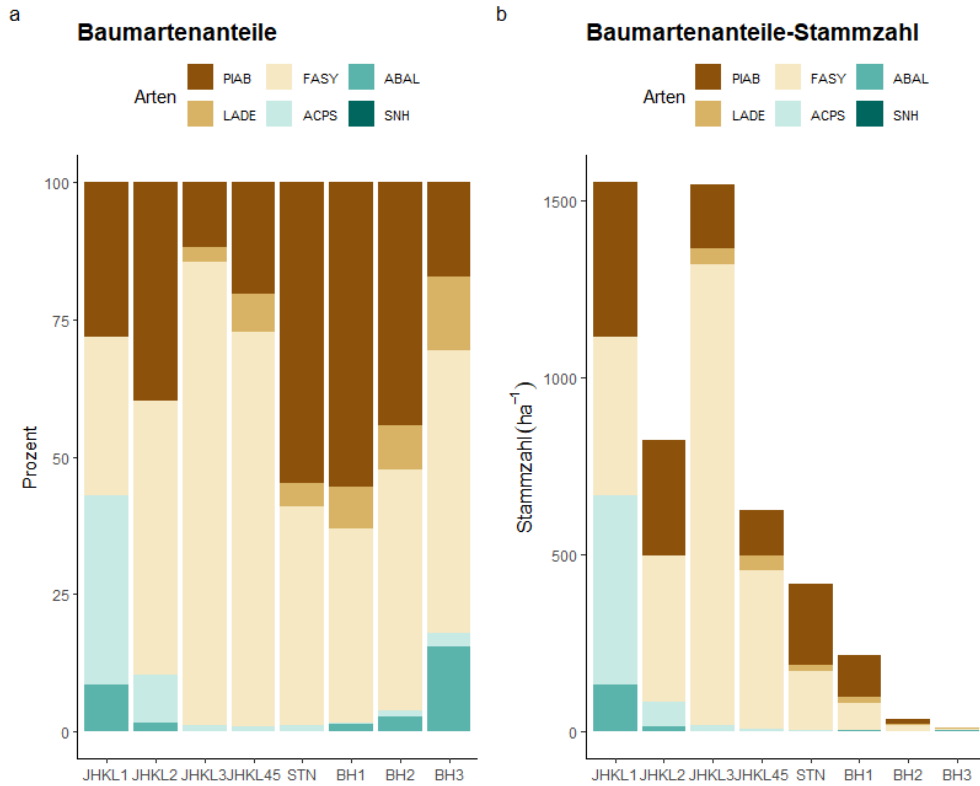
Abbildung 149 Stammzahl (N/ha) pro Baumart für die fünf Verjüngungsklassen (KL1–KL5). Aufgrund geringer Fallzahlen wurden die Klassen 4 und 5 zusammengefasst



In den Verjüngungsklassen (JHKL1–JHKL5) dominierten Laubbaumarten mit Anteilen von 62 % bis 89 %, wobei *Fagus sylvatica* (Buche) die am häufigsten vertretene Art war (Abbildung 150). In den stärkeren Entwicklungsstufen hingegen waren Nadelbaumarten vorherrschend, mit Anteilen von 53 % Baumholzklasse 2 (BH2) bis 63 % Baumholzklasse 1 (BH1). Auffällig ist, dass in Baumholzklasse 3 (BH3) erneut Buche die häufigste Art war, obwohl im gesamten Erhebungsgebiet nur wenige Bäume mit einem BHD über 50 cm erfasst wurden.

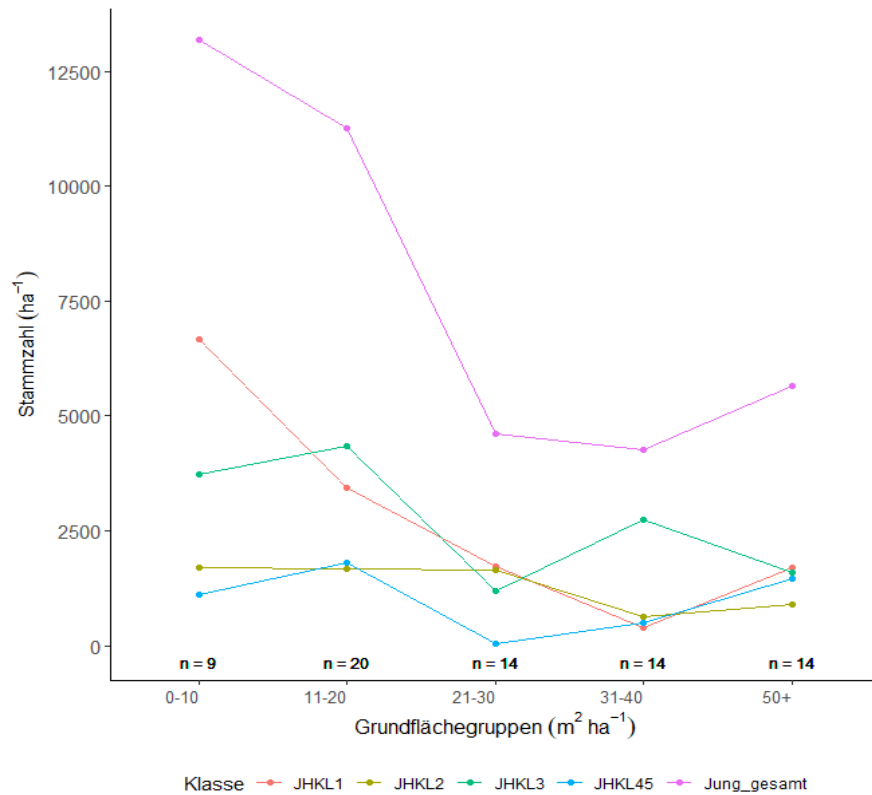
Abbildung 150 Prozentuale Baumartenanteile pro Wuchsklasse (a) und mittlere Stammzahl pro Baumart und Wuchsklasse (b). STN = Stangenholz ($10 \text{ cm} \leq D \leq 20 \text{ cm}$),

BH1 = Baumholz 1 ($20 \text{ cm} \leq D \leq 35 \text{ cm}$), BH2 = Baumholz 2 ($35 \text{ cm} \leq D \leq 50 \text{ cm}$), BH3 = Baumholz 3 ($D > 50 \text{ cm}$)



Die höchste Pflanzendichte des Jungwuchses über alle Höhenklassen hinweg wurde auf Flächen mit einer Grundfläche der Baumschicht von $< 10 \text{ m}^2/\text{ha}$ festgestellt (Abbildung 151). Besonders auffällig war dabei die Höhenklasse JHKL1 mit über 6.500 Stück/ha sowie eine Gesamtanzahl von mehr als 12.500 Stück/ha. Dies deutet auf einen offenen Kronenschluss und günstige Lichtverhältnisse für das Jungwuchswachstum hin. Mit zunehmender Grundfläche und dem damit einhergehenden wahrscheinlichen Kronenschluss im Bestand nimmt die Verjüngungsdichte in allen Höhenklassen ab, mit Ausnahme der Klasse JHKL2. Dennoch liegt die Pflanzendichte weiterhin über 2.000 Stück/ha. Der Großteil der Verjüngung besteht aus Buche, einer Baumart, die auch unter geschlossener Baumschicht geringe Lichtverhältnisse gut tolerieren kann. Der Anstieg der Verjüngungsdichte bei Grundflächen über $40 \text{ m}^2/\text{ha}$ lässt sich vermutlich auf Kronenlücken infolge von Baumsterblichkeit nach der Stammzahlreduktion (Stem Exklusion Phase) oder durch lokale Störungen zurückführen.

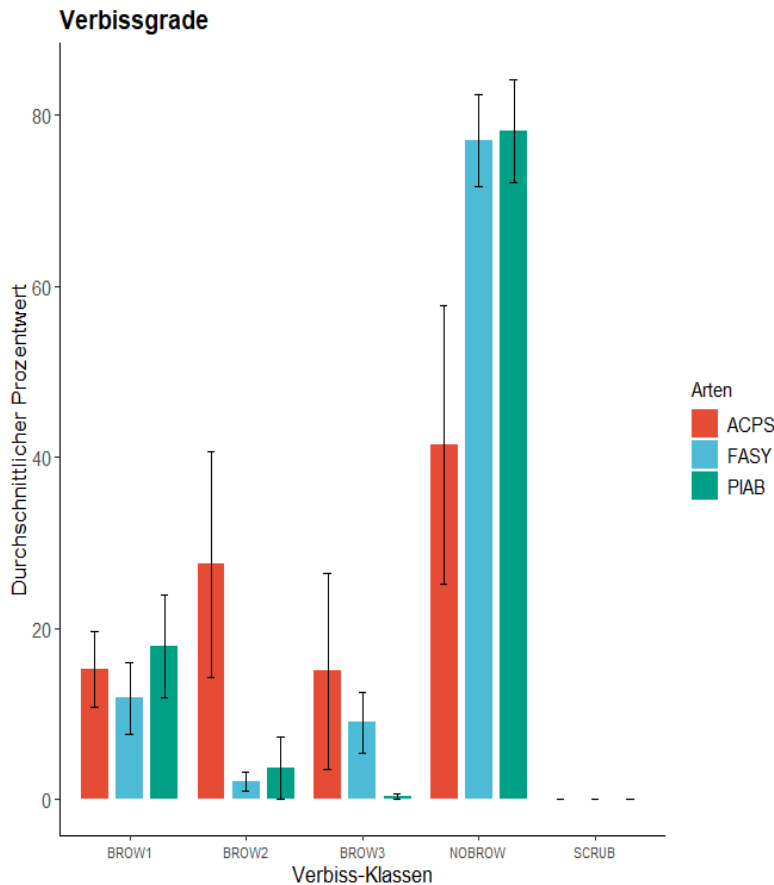
Abbildung 151 Pflanzendichte (Stammzahl/ha) der Jungwuchsklassen (JHKL1–5) nach der Grundfläche der Baumschicht in Klassen von 10 m²/ha. N = Anzahl der Stichprobepunkte pro Grundflächenklasse



Über alle Verbisskategorien hinweg war die Klasse Nobrow (kein Verbiss) am häufigsten vertreten. Die Buche und Fichte wiesen mit Nobrow von 78 % bzw. 77 % den geringsten Verbissanteil auf (Abbildung 152). Der Bergahorn zeigte hingegen den höchsten Verbiss, mit 15 % der Individuen in der Kategorie Brow1 (Verbissklasse 1) und bis zu 27 % in Brow2 (Verbissklasse 2). Dennoch zeigten 41 % der untersuchten Bergahorn-Individuen keine Verbisspuren. In der stärksten Verbissklasse (Brow3) wies Bergahorn mit durchschnittlich 15 % den höchsten Anteil auf, während Fichte mit weniger als 1 % kaum betroffen war.

Insgesamt deutet die hohe Dichte der Verjüngung insbesondere bei Buche trotz moderatem Verbiss in einzelnen Klassen auf ein gutes Verjüngungspotenzial von Buche im Untersuchungsgebiet hin.

Abbildung 152 Anteile der Verbissgrade pro Baumart und Verbissklassen mit Standardfehlerbalken. ACPS = *Acer pseudoplataneus* (Bergahorn), FASY = *Fagus sylvatica* (Buche), PIAB = *Picea abies* (Fichte)



Strauchschicht

Zur Strauchschicht wurden alle verholzten Pflanzen gezählt, die eine Höhe von über 1,3 m und einen BHD von unter 10 cm aufwiesen. Laubbaumarten dominierten deutlich und machten 86 % der Gesamtzahl aus, während Nadelbaumarten lediglich 12 % stellten (Abbildung 153). Die durchschnittliche Höhe der Strauchschicht betrug 6,3 m; 39 % der Stichprobepunkte überschritten diesen Wert (Abbildung 153b). Die Strauchschicht stellte nur einen geringen Anteil an der Gesamtgrundfläche im Untersuchungsgebiet dar, mit einer mittleren Grundfläche von lediglich 3,1 m²/ha. Davon entfielen 2,41 m²/ha auf Laubbäume und lediglich 0,68 m²/ha auf Nadelbäume. Die mittlere Pflanzendichte betrug 2.763 Stück/ha, davon 2.300 Laubbäume und 393 Nadelbäume (

Abbildung 154).

Abbildung 153 (a) Prozentualer Anteil von Laub- und Nadelbäumen pro Stichpunkt (Punkt-ID), berechnet nach Pflanzendichte, und (b) durchschnittliche Höhe sowie Lorey'sche Mittelhöhe für alle 66 Stichprobepunkte. Die rote gestrichelte Linie zeigt die mittlere Höhe der Strauchschicht an

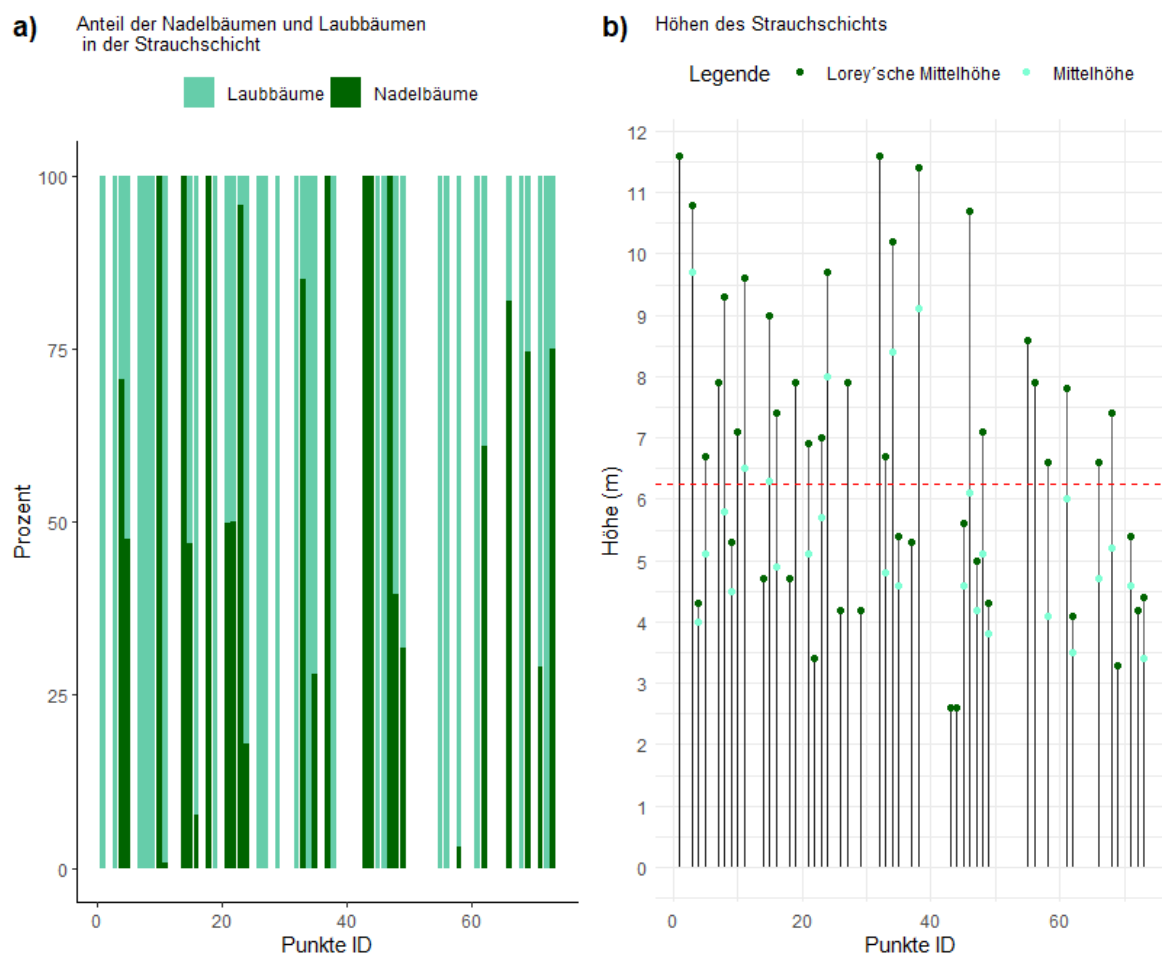
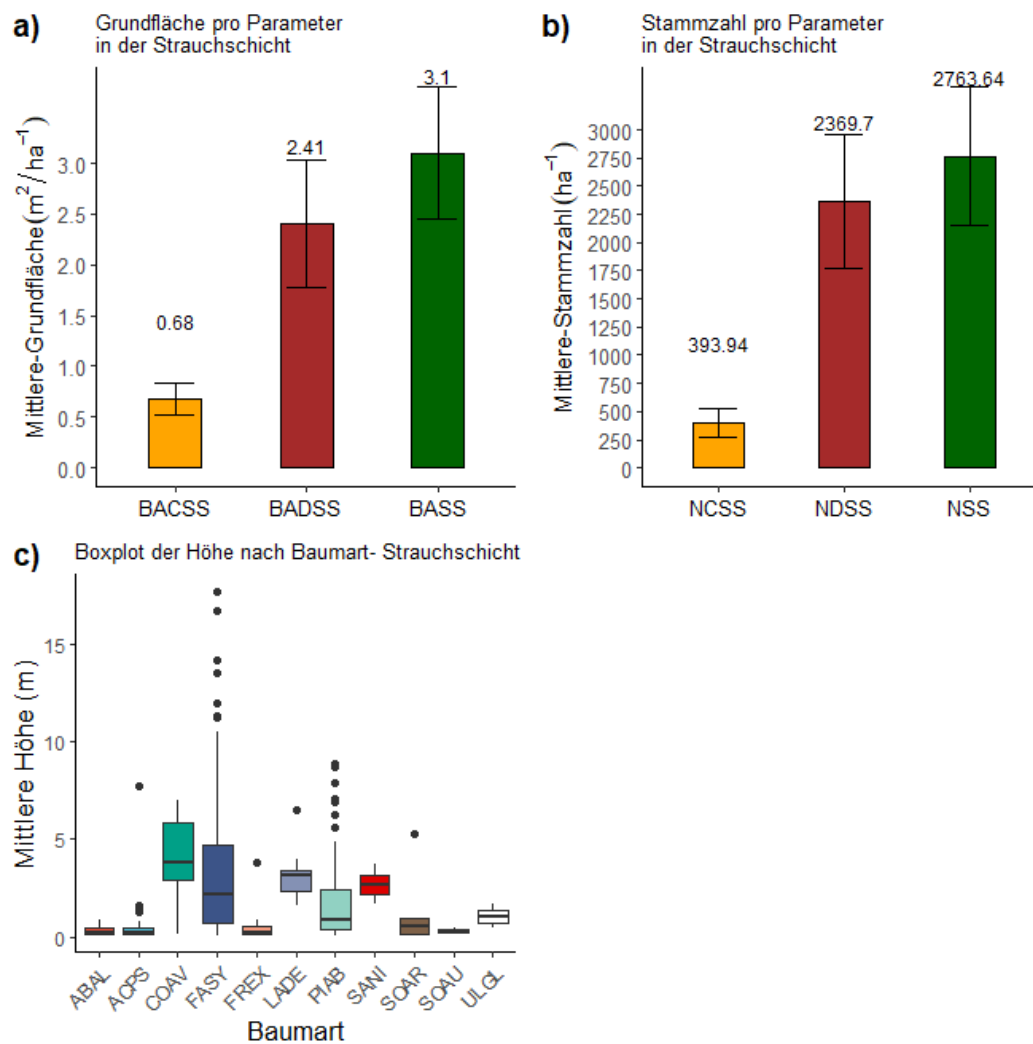


Abbildung 154 (a) Durchschnittliche Grundfläche (m^2/ha), (b) Stammzahl ($\text{Stück}/\text{ha}$), (c) Durchschnittliche Höhe (m) pro Baumart in der Strauchschicht. Anmerkung: BACSS = Grundfläche Nadelbäume der Strauchschicht, BADSS = Grundfläche Laubbäume der Strauchschicht, BASS = Gesamte Grundfläche der Strauchschicht, NCSS = Stammzahl Nadelbäume der Strauchschicht, NDSS = Stammzahl Laubbäume der Strauchschicht, NSS = Gesamte Stammzahl der Strauchschicht. ABAL = *Abies alba*, ACPS = *Acer pseudoplataneus*, COAV = *Corylus avellana*, FASY = *Fagus sylvatica*, FREX = *Fraxinus*

excelsior, LADE = *Larix deciduous*, PIAB = *Picea abies*, SANI = *Sambucus nigra*, SOAR = *Sorbus aria*, SOAU = *Sorbus aucuparia*, ULGL = *Ulmus glabra*



Baumschicht (WZP4, CSP7)

Insgesamt wurden 742 Bäume aufgenommen. Davon wurden 612 Bäume im Rahmen der CSP7-Erhebung erfasst und 451 Bäume bei der WZP4-Erhebung. Nur 130 Bäume (17 %) wurden außerhalb des 7-Meter-Radius aufgenommen, alle ausschließlich im Zuge der WZP4-Erhebung. Aufgrund methodischer Unterschiede bei der Berechnung bestimmter Bestan-

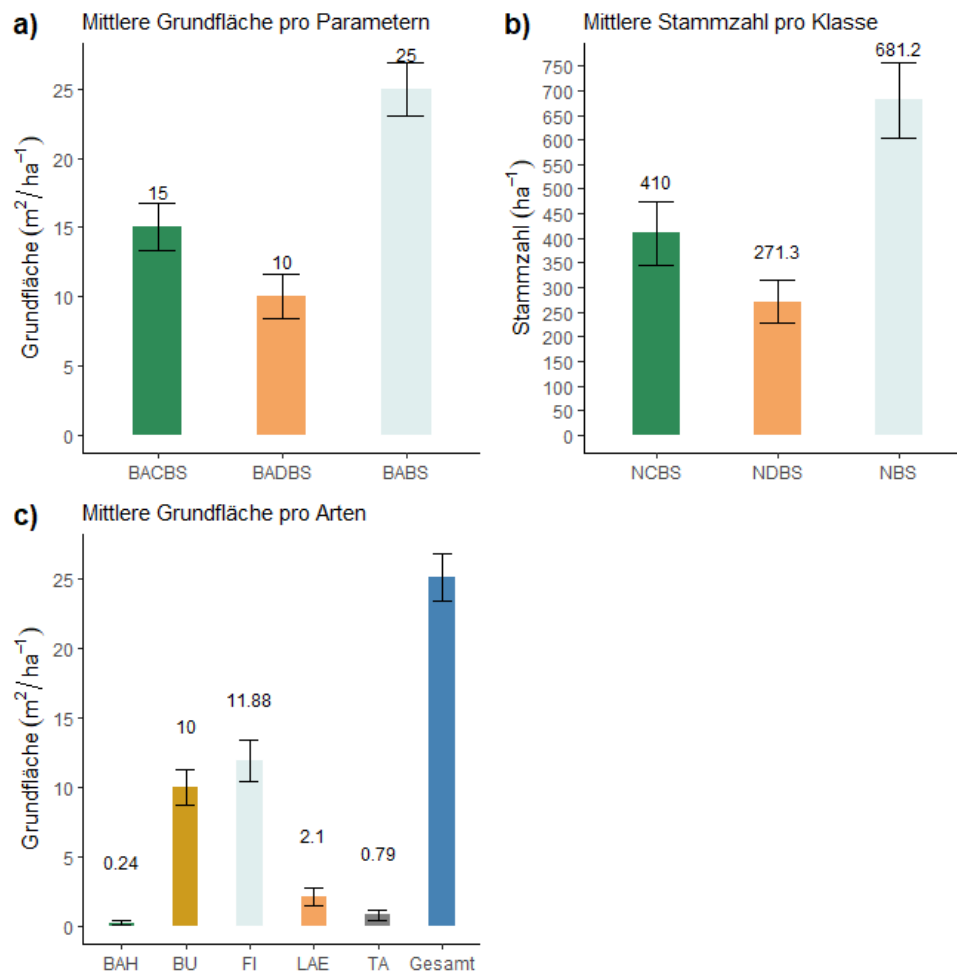
desparameter, wie Grundfläche und Stammzahl, zwischen starrer und variabler Probefläche, werden die Ergebnisse beider Erhebungsmethoden getrennt dargestellt. Ein Vergleich der Ergebnisse erfolgt im Abschnitt CSP7.

WZP4

Die durchschnittliche Grundfläche der Baumschicht im Untersuchungsgebiet betrug 25 m²/ha. Davon entfielen 60 % auf Nadelbaumarten und 40 % (entsprechend 10 m²/ha) auf Laubbaumarten. Dieses Verhältnis unterscheidet sich deutlich von der Strauchschicht, in der Laubbaumarten den Großteil der Grundfläche ausmachten. Innerhalb der Baumschicht wies die Fichte mit durchschnittlich 11,9 m²/ha die größte mittlere Grundfläche auf, gefolgt von der Buche mit 10,0 m²/ha (Abbildung 155). Andere Baumarten wie Bergahorn, Lärche und Tanne trugen jeweils weniger als 2,0 m²/ha zur Gesamtgrundfläche bei. Auch hinsichtlich der Stammzahlverteilung setzten sich 60 % der Individuen aus Nadelbäumen und 40 % aus Laubbäumen zusammen. Die durchschnittliche Stammzahl in der Baumschicht, basierend auf den Erhebungen mit WZP4, lag bei 680 Bäumen pro Hektar.

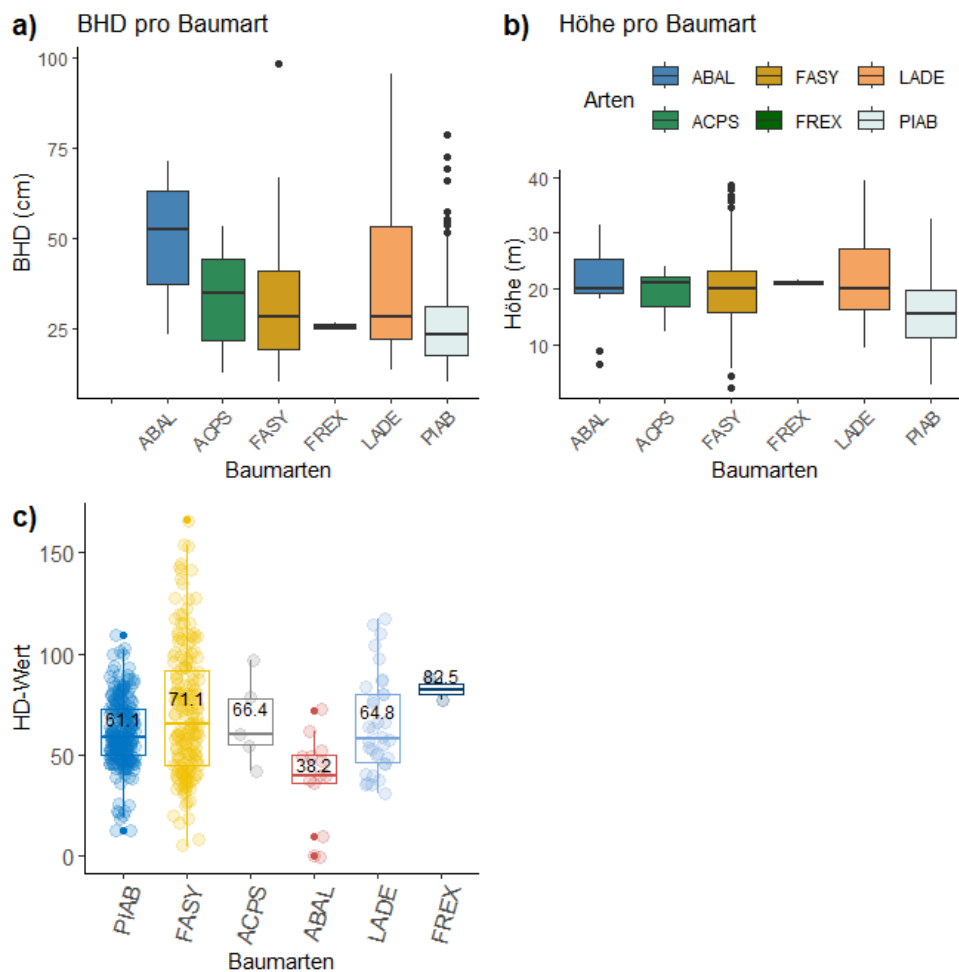
Abbildung 155 (a) Durchschnittliche Grundfläche, (b) Stammzahl, (c) Grundfläche nach Arten im TEZG 1.4. BACBS = Grundfläche der Nadelbäume in der Baumschicht, BADBS = Grundfläche der Laubbäume in der Baumschicht, BABS = Gesamte Grundfläche der Baumschicht. NCBS = Stammzahl der Nadelbäume in der Baumschicht, NDBS = Stammzahl der Laubbäume in der Baumschicht, NBS = Gesamtstammzahl der Baumschicht. BAH =

Acer pseudoplataneus, BU = *Fagus sylvatica*, FI = *Picea abies*, LAE = *Larix decidua*, TA = *Abies alba*



Die Tanne wies mit einem durchschnittlichen BHD von 50,7 cm den größten Stammumfang auf, gefolgt von Lärche mit 38 cm. Fichte hatte mit durchschnittlich 25 cm den geringsten BHD (Abbildung 156). Die mittlere Stammhöhe lag bei den meisten Baumarten, darunter Tanne, Bergahorn, Buche und Lärche, bei etwa 21 m, während Fichte mit durchschnittlich 15 m etwas niedriger war. Der sogenannte HD-Wert, ein Indikator für Baumstabilität, ergibt sich aus dem Verhältnis von Höhe zu Stammdurchmesser. Bäume mit einem HD-Wert von 80:1 oder geringer gelten als stabil (Woon & O'Hara, 2001). Basierend auf diesem Kriterium können alle Baumarten im Untersuchungsgebiet, mit Ausnahme der Gemeinen Esche, als stabil eingestuft werden. Tanne zeigte den niedrigsten HD-Wert und damit die höchste beobachtete Stabilität.

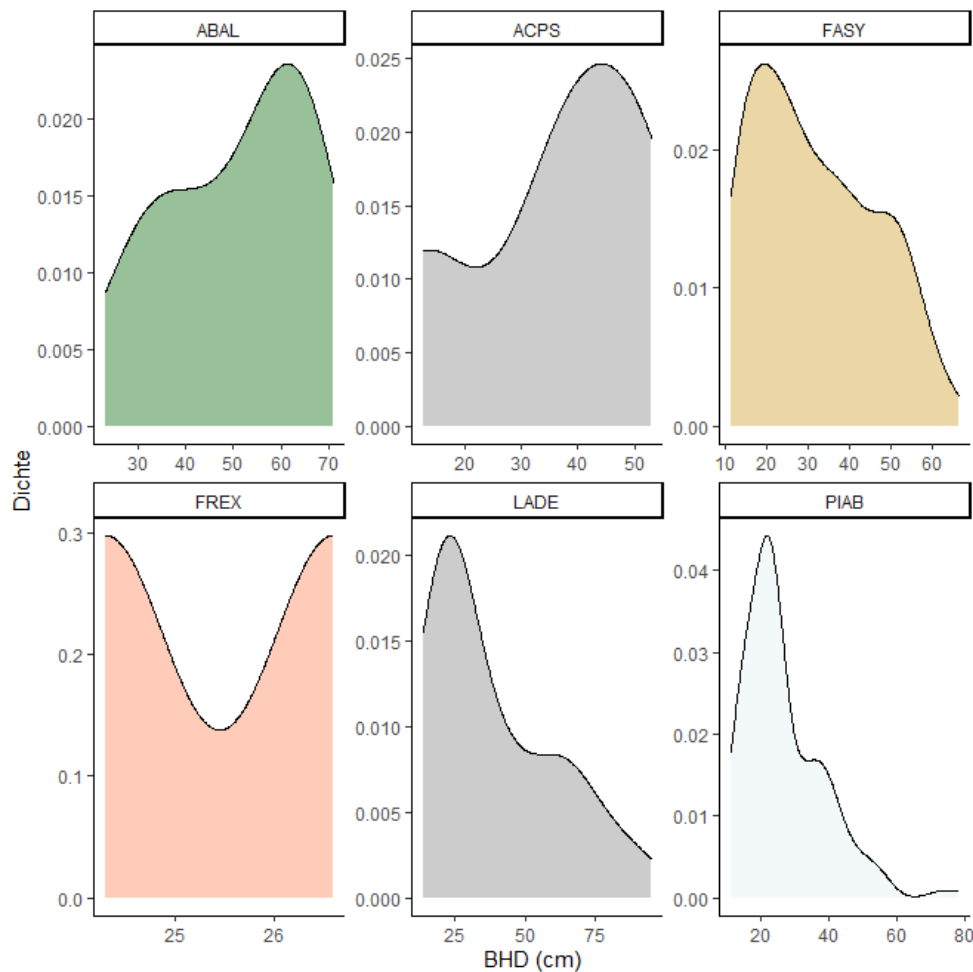
Abbildung 156 (a) Durchschnittliche BHD (cm), (b) Durchschnittliche Höhe (m), und (c) HD-Wert pro Baumart (PIAB, FASY, ACPS, ABAL, LADE, FREX) für Bäume aus der WZP4 in der Baumschicht. PIAB = *Picea abies*, FASY = *Fagus sylvatica*, ACPS = *Acer pseudoplataneus*, ABAL = *Abies alba*, LADE = *Larix decidua*, FREX = *Fraxinus excelsior*



Bei der Betrachtung der BHD-Verteilung zeigte sich, dass Tanne und Bergahorn überwiegend in den oberen Durchmesserklassen (40–50 cm) vertreten waren, während Buche, Lärche und Fichte eine stärkere Verteilung in den kleineren BHD-Klassen (10–30 cm) aufwiesen (Abbildung 157). Insgesamt wurden im gesamten Untersuchungsgebiet nur zwei Individuen von Gemeiner Esche erfasst, die jeweils ein Extrem der BHD-Verteilung repräsentierten.

Abbildung 157 BHD-Verteilung in 10-cm-Klassen auf der x-Achse und Beobachtungsdichte (Stammzahl) auf der y-Achse. Anmerkung: ABAL = *Abies alba*, ACPS = *Acer*

pseudoplataneus, FASY = *Fagus sylvatica*, FREX = *Fraxinus excelsior*, LADE = *Larix decidua*, PIAB = *Picea abies*



CSP7

Im Rahmen der CSP7-Erhebung entfiel die Mehrheit der aufgenommenen Bäume auf Fichte (53 %), Buche (37 %), Lärche (8 %) und sonstige Arten (2 %). ANOVA-Tests wurden durchgeführt, um Unterschiede im mittleren BHD, in der Baumhöhe sowie im HD-Wert zwischen vier Baumarten zu analysieren: Fichte, Mehlbeere, Buche, und Lärche. Es konnten keine signifikanten Unterschiede im mittleren BHD zwischen den Arten festgestellt werden ($F = 0,79$; $p = 0,5$) (Tabelle 37). Die Analyse ergab signifikante Unterschiede in der Baumhöhe zwischen den Arten ($F = 20,7$; $p < 0,001$). Die Tukey HSD Post-hoc-Vergleiche zeigten: Buche wies eine signifikant größere mittlere Höhe (16,6 m) auf als Fichte (12,8 m), ($p < 0,001$) (Abbildung 158). Es wurden deutliche Unterschiede im HD-Verhältnis zwischen den Arten festgestellt ($F = 16,2$; $p < 0,001$). Buche zeigte mit einem mittleren HD-Wert von 89,8 den höchsten Wert, höher als bei allen anderen Arten. Fichte, Lärche und Mehlbeere bildeten

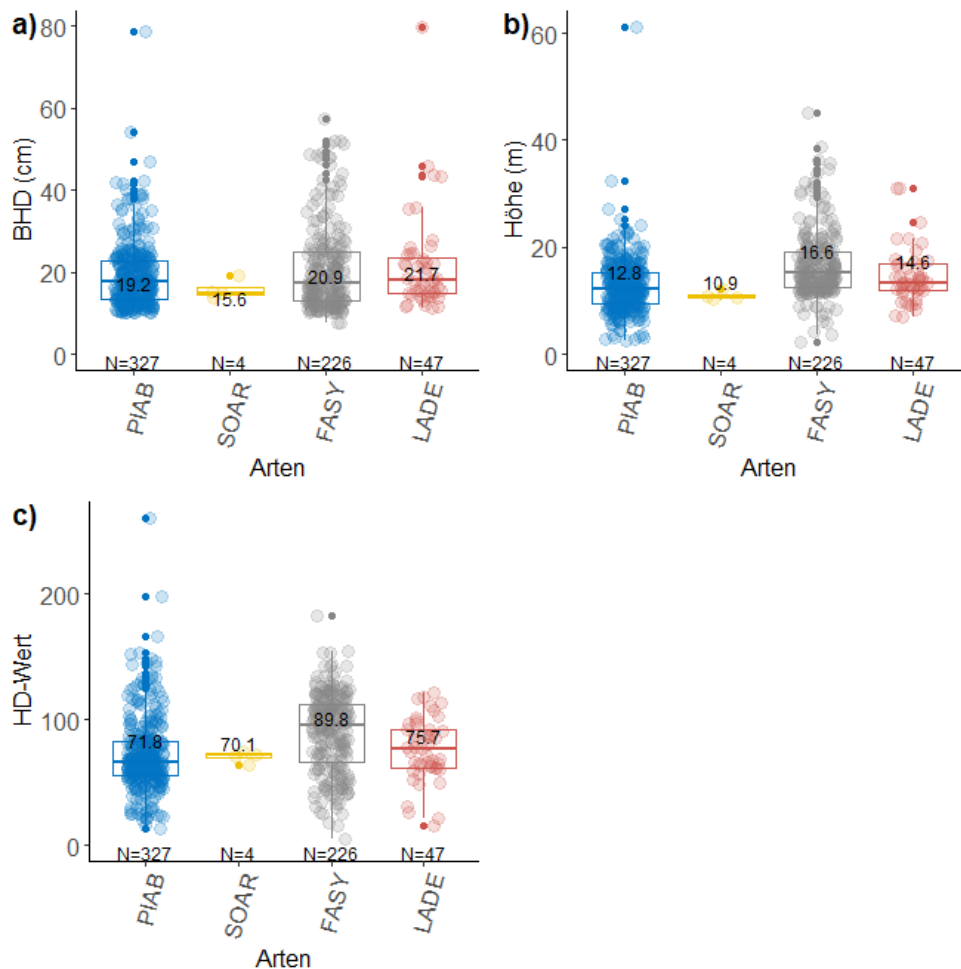
eine eigene Gruppe mit niedrigeren HD-Werten (~75), wobei sich Fichte, Mehlbeere und Lärche untereinander nicht signifikant unterschieden. Der Unterschied im HD-Wert zwischen Buche und Lärche ($p = 0,02$) und Buche und Fichte war ebenfalls signifikant ($p < 0,001$). Diese Ergebnisse zeigen, dass sich die untersuchten Arten hinsichtlich Baumhöhe und Stabilitätskennwert (HD-Wert) deutlich unterscheiden, während der BHD zwischen den Arten relativ ähnlich ist. Insbesondere Buche weist tendenziell höhere Bäume und ein ausgeprägteres Höhen-Durchmesser-Verhältnis auf, was auf artspezifische Wachstumsstrategien oder unterschiedliche Bestandes-Dynamiken hinweisen könnte.

Tabelle 37 Ergebnisse des einseitigen Anova-Tests zum Vergleich BHD, Höhe, und HD-Wert für die Baumarten Fichte (PIAB), Mehlbeere (SOAR), Buche (FASY), und Lärche (LADE) in der CSP7

Arten	Mittelwert	df	f	p	Vergleich	lwr	upr	p
BHD* [cm]								
FASY	20,8							
LADE	21,7	3	0,79	0,5				
PIAB	19,2							
SOAR	15,6							
Höhe [m]								
FASY ^a	16,6				FASY vs. PIAB	-5,01	-2,52	< 0,001
LADE ^{ab}	14,6	3	20,7	< 0,01	LADE vs. FASY	-4,32	0,292	0,11
PIAB ^b	12,8				LADE vs. PIAB	-1,74	0,5	0,19
SOAR ^{ab}	10,9				SOAR vs. LADE	-11,8	3,82	0,59
HD-Wert								
FASY ^a	89,8				FASY vs. PIAB	-24,7	-11,25	< 0,001
LADE ^{ab}	75,6	3	16,2	< 0,001	LADE vs. FASY	-25,6	-1,73	0,02
PIAB ^b	71,8				LADE vs. PIAB	-15,88	8,27	0,85
SOAR ^{ab}	70,1				SOAR vs. LADE	-45,88	34,77	0,98

Anmerkung: df = Freiheitsgrad, f = F-Statistik, p = p-Wert, lwr = untere 95% Konfidenzintervallgrenze, upr = obere 95% Konfidenzintervallgrenze. Zur Erfüllung der Modellannahmen hinsichtlich Normalverteilung und Homogenität der Residuen wurden die abhängigen Variablen mit Box-Cox transformiert. Kleinbuchstaben neben den Baumarten-Codes kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen mit $p \leq 0,05$.

Abbildung 158 Vergleich der Parameter (a) Brusthöhendurchmesser (BHD), (b) Baumhöhe und (c) HD-Wert zwischen den Baumarten Fichte (PIAB), Mehlbeere (SOAR), Buche (FASY) und Lärche (LADE) aus der CSP7-Stichprobe. Die Zahlen in den Boxen geben den Mittelwert des jeweiligen Parameters an. Die hellen Punkte repräsentieren die Einzelbeobachtungen pro Baumart



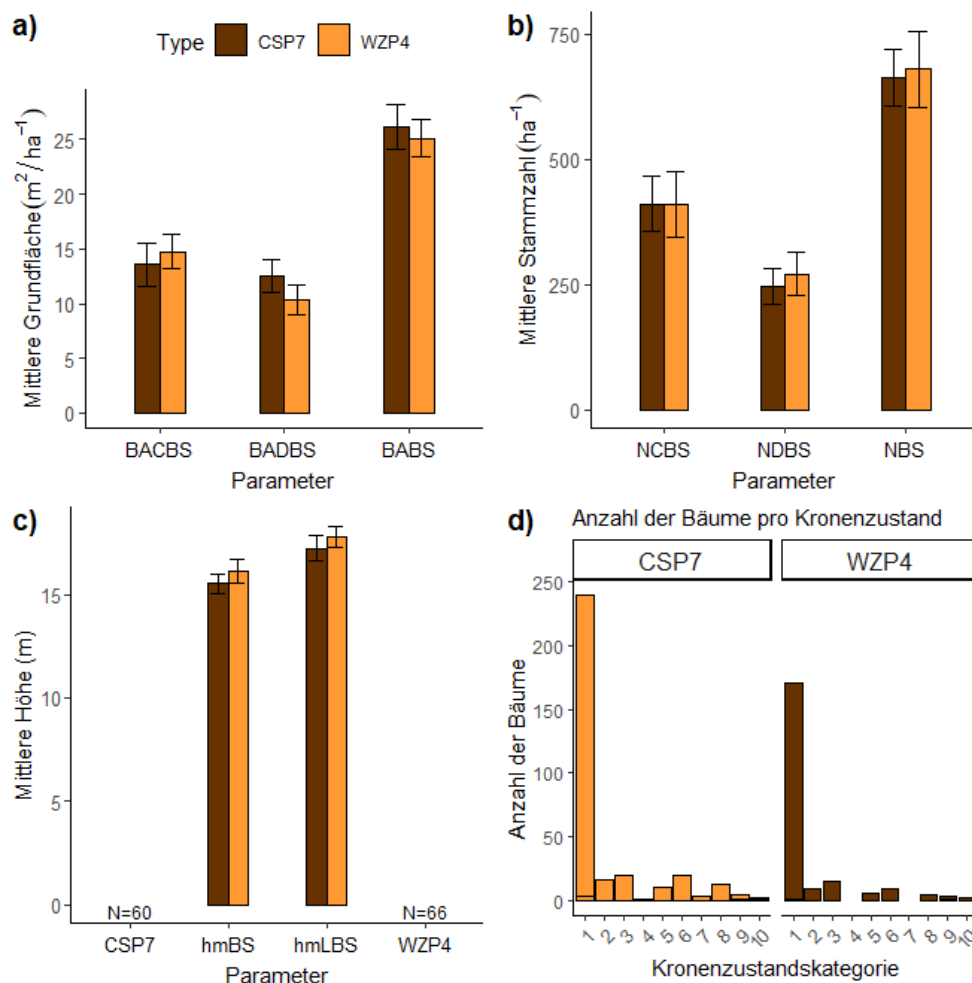
Vergleich der In-Situ Erhebungsmethoden CSP7 und WZP4

Die mittlere Gesamtgrundfläche (BABS) war in der WZP4 mit 25 m²/ha ähnlich wie in den CSP7-Erhebungen mit 26 m²/ha (Abbildung 159). Mit beiden Erhebungsverfahren zeigte sich ein höherer Anteil der Grundfläche bei Nadelbäumen im Vergleich zu Laubbäumen. In der CSP7-Stichprobe wiesen Nadelbäume nur eine um 8 % höhere mittlere Grundfläche (13,5 m²/ha) auf als Laubbäume (12,5 m²/ha). Ein ähnliches Muster zeigte sich bei der WZP4, bei der die Grundfläche der Nadelbäume um 42 % über jener der Laubbäume lag.

Auch in Bezug auf die Stammzahl war in der WZP4 ein höherer Wert für Nadelbäume (409 Stück/ha) im Vergleich zu Laubbäumen (270 Stück/ha) zu beobachten. In der CSP7-Erhebung ist die Stammzahl der Laubbäume um 67 % geringer als die der Nadelbäume. In der WZP4-Stichprobe wurde eine insgesamt nur 3 % höhere Stammzahlen pro Hektar berechnet als in der CSP7-Stichprobe.

Die durchschnittliche Bestandeshöhe betrug 16 m und die mittlere Lorey'sche Höhe 18 m in der WZP4, was ähnlich ist wie in der CSP7 mit einer durchschnittlichen Höhe von 15 m und einer Lorey'sche Höhe von 17 m. In beiden Erhebungen waren über 90 % der aufgenommenen Bäume als vital eingestuft (Status 1: lebend, gesund, ohne Kronenbruch oder -verformung).

Abbildung 159 Vergleich der Parameter der Baumschicht zwischen CSP7 und WZP4 Stichproben: (a) Grundfläche (m^2/ha), (b) Stammzahl (Stück/ha), (c) Bestandeshöhe (m), (d) Kronenzustand



Obwohl in sechs von 66 Parzellen innerhalb des 7 m-Radius des CSP7-Probekreises keine Bäume erfasst wurden, während in den WZP4-Parzellen Bäume gemessen wurden, lieferten beide Erhebungsmethoden insgesamt vergleichbare Ergebnisse hinsichtlich der mittleren Grundfläche, Stammzahl und durchschnittlichen Bestandeshöhe. Die Ergebnisse der gepaarten t-Tests (Tabelle 38) zeigen, dass für die meisten untersuchten Variablen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Methoden vorliegen ($p > 0,05$). Einzige Ausnahme bildet die Gesamtstammzahl (NBS_alle), bei der WZP4 im Mittel signifikant höhere Werte als CSP7 lieferte ($p = 0,002$). Dies deutet darauf hin, dass CSP7 in bestimmten Fällen, vor allem in lichten oder heterogenen Beständen, weniger Bäume erfassen kann.

In Schutzwäldern, die häufig in steilem und schwer zugänglichem Gelände liegen, bietet der starre, kreisförmige Probekreis (CSP7) jedoch praktische Vorteile aufgrund seines einfachen und zeiteffizienten Aufbaus. Allerdings kann der begrenzte Radius dazu führen, dass vereinzelt stehende Bäume nicht in die Erhebung einbezogen werden. Die WZP4-Methode hingegen, bei der eine Winkelzählprobe mit variabler Probekreisgröße angewendet wird, ist besser geeignet, um die räumliche Variabilität in unregelmäßigen Beständen zu erfassen. Dies ist besonders in komplexen Bergwäldern von Bedeutung, in denen Bestandsdichte und Baumartenzusammensetzung über kurze Distanzen stark variieren können.

Tabelle 38 Ergebnisse der gepaarten t-Tests zwischen den Erhebungsmethoden CSP7 und WZP4 für die durchschnittliche Bestandeshöhe, die Grundfläche und die Stammzahl auf den 66 SPZ-Flächen

Abhängige Variable	N CSP7 WZP4	CSP7 mittlerer Wert	WZP4 mittlerer Wert	t-Wert	df	p	95% CI
hmBS	60 66	21,3	21,8	-0,98	59	0,332	[-1,37, 0,47]
NBS_c	60 66	411,4	410	-0,92	59	0,36	[-119,6, 44,4]
NBS_d	60 66	246,8	271,3	-1,43	59	0,16	[-118,7, 19,6]
NBS_alle	60 66	658,2	761,1	-3,16	59	0,002	[-283,5, -63,8]
BA_c	60 66	13,6	14,7	-1,3	59	0,2	[-5,5, 1,17]
BA_d	60 66	12,5	10,4	0,97	59	0,33	[1,44, 4,18]
BA_alle	60 66	26,1	27,3	-1,55	59	0,12	[-6,85, 0,87]

Anmerkung: n = Anzahl der untersuchten Parzellen, t-Wert = Teststatistik des gepaarten t-Tests, df = Freiheitsgrade, p = p-Wert (Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$), 95% KI = 95 % Konfidenzintervall, hmBS = mittlere

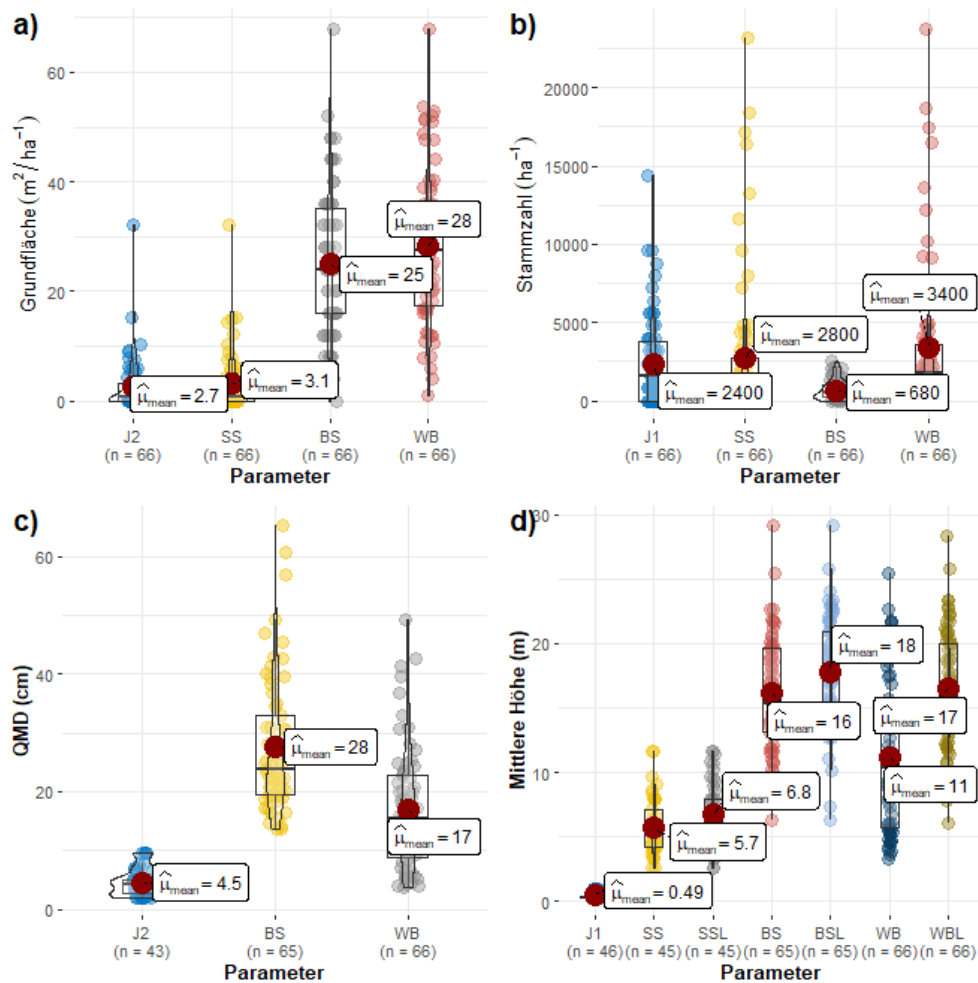
Abhängige Variable	N CSP7 WZP4	CSP7 mittlerer Wert	WZP4 mittlerer Wert	t-Wert	df	p	95% CI
Bestandeshöhe, NBS_c = Stammzahl der Nadelbäume, NBS_d = Stammzahl der Laubbäume, NBS_alle, gesamte Stammzahl (Nadel & Laubbäume), BA_c = Grundfläche der Nadelbäume, BA_d = Grundfläche der Laubbäume, BA_alle = gesamte Grundfläche (Nadel & Laubbäume).							

Waldbestände-WZP4

Die Strauch- und Baumschicht bildeten gemeinsam den betrachteten Waldbestand. Überraschenderweise wies die Baumschicht mit durchschnittlich 25 m²/ha die größte mittlere Grundfläche auf, während die gesamte mittlere Bestandesgrundfläche bei 28 m²/ha lag (Abbildung 160). Dies deutet darauf hin, dass die Strauchschicht nur einen geringen Beitrag zur Gesamtgrundfläche leistete. Die mittlere Pflanzendichte pro Waldbestand im Untersuchungsgebiet betrug 3.400 Stück/ha, wobei die Strauchschicht mit etwa 2.800 Stück/ha den größten Anteil aufwies. Der quadratische Mitteldurchmesser (QMD) war in der Baumschicht mit 28 cm am höchsten. Die mittlere Bestandeshöhe der Baumschicht betrug 16 m, während die Lorey'sche mittlere Höhe bei 18 m lag. Die Lorey'sche mittlere Höhe über alle Schichten hinweg betrug im Durchschnitt 17 m.

Abbildung 160 Vergleich zwischen Bestandesschichten; Verjüngung (J1,J2), Strauchschicht (SS), Baumschicht (BS), Waldbestand (WB) für Parameter (a) Grundfläche, (b) Stammzahl, (c) QMD, (d) Bestandeshöhe. Die roten Punkte sind die Mittelwerte pro Parameter. Die farbigen Punkte repräsentieren die einzelnen Beobachtungen pro Parameter. Anmerkung:

SSL = Lorey'sche Höhe Strauchschicht, BSL= Lorey'sche Höhe Baumschicht, WBL= Lorey'sche Höhe Waldbestand.



Vergleich der durch BFW und ÖBf erhobenen terrestrische Stichproben

Drei repräsentative Baumarten, die sowohl an den BFW als auch an den ÖBf-Stichprobepunkten erfasst wurden, wurden hinsichtlich der Parameter Baumhöhe, BHD, HD-Wert und Stammzahl miteinander verglichen (Abbildung 161). Die Ergebnisse der Welch's t-Tests zeigten lediglich bei der Buche einen signifikanten Unterschied in der Baumhöhe ($p < 0,001$). Ein signifikanter Unterschied im BHD wurde nur bei der Lärche festgestellt ($p = 0,04$), während beim HD-Wert ein signifikanter Unterschied für Buche beobachtet

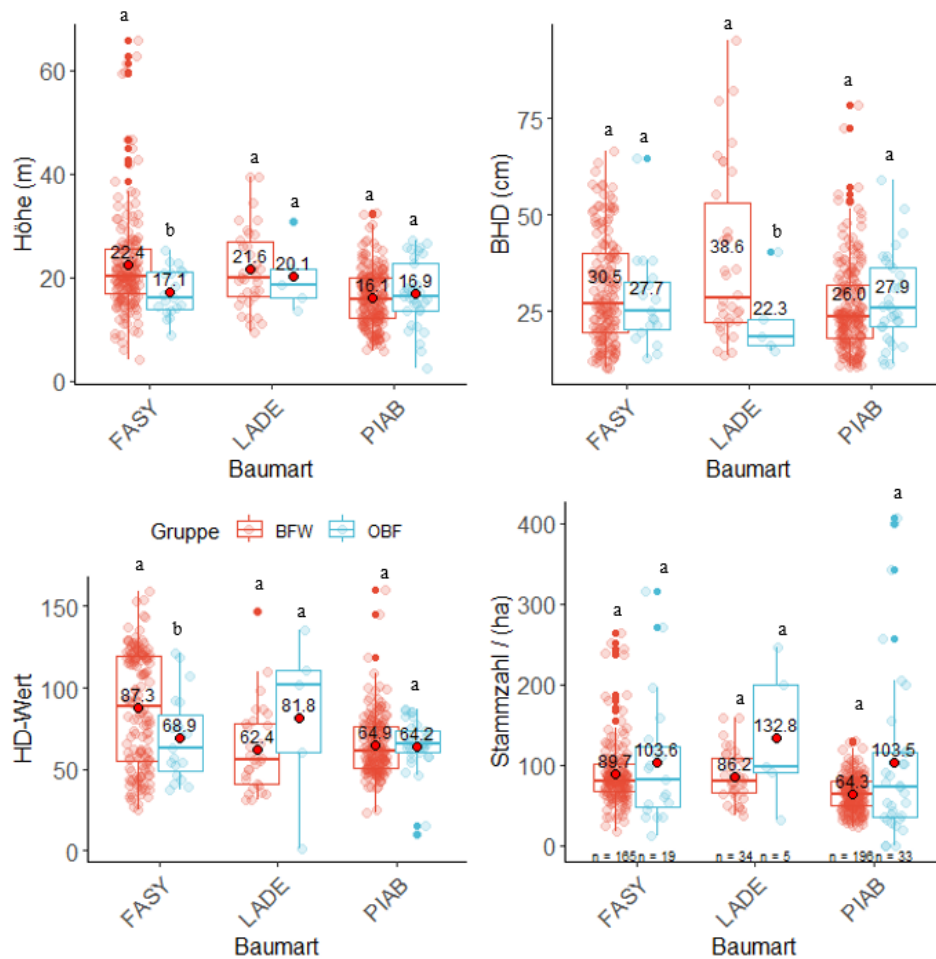
wurde ($p = 0,01$) (Tabelle 39). Diese Ergebnisse deuten wie erwartet darauf hin, dass in beiden Erhebungen insgesamt vergleichbare Bestandeswerte und Baumstrukturen im Untersuchungsgebiet TEZG 1.4 erfasst wurden.

Tabelle 39 Ergebnisse des Welchs t-Tests für die Parameter Höhe, BHD, HD-Wert und Stammzahl der Baumarten Buche (FASY), Lärche (LADE) und Fichte (PIAB) zwischen BFW- und ÖBf-Stichprobepunkten im Untersuchungsgebiet TEZG 1.4

Baumart	mittlere Werte		df	t-stat	p	conf-l	conf-u
	BFW	ÖBf					
Höhe [m]							
FASY	22,4	17,1	43	4,11	<0,001	2,72	7,96
LADE	21,5	20,1	6	0,44	0,68	-6,71	9,58
PIAB	16,1	16,9	40	-0,71	0,48	-3,21	1,54
BHD [cm]							
FASY	30,4	27,7	28	0,94	0,36	-3,33	8,92
LADE	38,6	22,3	4	2,49	0,04	0,09	2,6
PIAB	26,0	27,9	23	-0,84	0,41	-6,25	2,58
HD-Wert							
FASY	87,3	68,9	27	2,72	0,01	4,53	32,1
LADE	62,4	81,8	4	-0,71	0,46	-84	45,3
PIAB	64,9	64,1	48	0,23	0,81	-5,82	7,37
Stammzahl [ha]							
FASY	89,7	103,6	19	-0,72	0,47	-53,8	26,1
LADE	86,2	132,8	4	-1,18	0,3	-154	61,1
PIAB	64,3	103,5	32	-2,08	0,05	-77,6	-0,92
Anmerkung: df = Freiheitsgrade, t = t-Statistik, p = p-Wert, conf-l = untere 95% Konfidenzintervallgrenze, conf-u = 95% obere Konfidenzintervallgrenze. FASY = <i>Fagus sylvatica</i> , LADE = <i>Larix decidua</i> , PIAB = <i>Picea abies</i> .							

Abbildung 161 Boxplot Ergebnisse für die Parameter Höhe, BHD, HD-Wert und Stammzahl der Baumarten Buche (FASY), Lärche (LADE) und Fichte (PIAB) zwischen BFW (rot)- und

ÖBf (hellblau) Stichprobepunkten im Untersuchungsgebiet TEZG 1.4. Die in den Boxplots dargestellten Zahlen entsprechen den jeweiligen Mittelwerten. Die Buchstabenkennzeichnung zeigt signifikante Unterschiede zwischen den Stichprobenerhebungen BFW und ÖBf



ULS, ALS & UAS-P Auswertungen

Tabelle 40 gibt einen Überblick über die Anzahl und Dichte der mit den verschiedenen Fernerkundungsmethoden (ULS, ALS & UAS-P) im MEZG-Rindbach erhobenen Punktwolken. Die Anzahl bezieht sich, wie im Abschnitt Methodik beschrieben, jeweils auf die Menge der gefilterten Punkte nach dem zweiten Prozessierungsschritt. In Summe stehen für die Berechnung dendrometrischer Parameter ca. 1,64 Mrd. ULS-Punkte auf einer Fläche von ca. 76 ha in den Gebieten A & B (*leaf-off*), und dem Gebiet C (*leaf-on*) zur Verfügung (Abbildung 130). Mittels UAS-P wurden in Summe ca. 504 Mio. Punkte errechnet und mit ALS 83 Mio. erzeugt.

Die daraus errechneten Punktdichten und mittleren -abstände zeigen, dass bei fehlender Belaubung eine deutlich höhere Menge an Punkten und damit eine höhere Punktdichte/m², respektive ein kleinerer mittlerer Punktabstand erzielt werden kann, als bei der Befliegung von belaubten Beständen - 2.400 Pkt./m² und 2 cm Punktabstand versus 1.400 Pkt./m² und 2,7 cm Punktabstand bei den ULS-Befliegungen. Dasselbe Verhältnis von ca. 40% weniger aufgenommenen / errechneten Punkten bei *leaf-on* gegenüber *leaf-off* zeigt sich bei den UAS-P Resultaten. Die ALS-Daten werden generell von einer weitaus größeren Höhe über Grund als die ULS-Daten aufgenommen. Dies erklärt die deutlich geringere Punktdichte und den größeren Punktabstand (ca. 110 Punkte/m² und 10 cm Punktabstand).

Tabelle 40 Details zu den LiDAR-Kampagnen im MEZG-Rindbach, bezogen auf die gefilterten und vor-prozessierten Punktwolken

Quelle	Belaubung	Anz. Punkte	Punktdichte [Pkt./m ²]	mittl. Punktabstand [m]
ULS	leaf-off	~ 1.270 Mio	~ 2.400	0,020
	Leaf-on	~ 370 Mio	~ 1.400	0,027
UAS-P	leaf-off	~ 377 Mio	~ 730	0,037
	Leaf-on	~ 127 Mio	~ 470	0,046
ALS	leaf-off	~ 83 Mio	~ 110	0,098

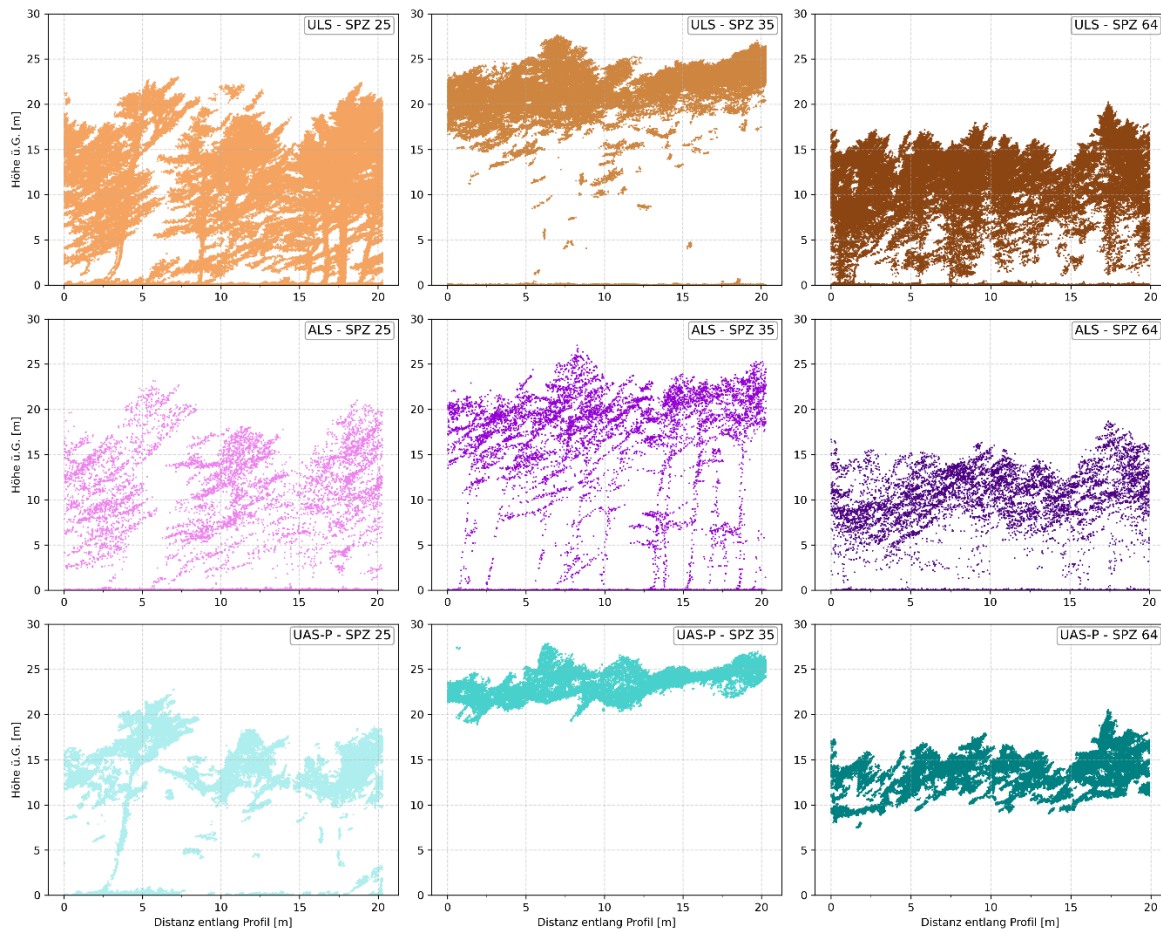
Einen besseren Einblick in die (vertikale) Verteilung der mit den verschiedenen Fernerkundungsmethoden unter unterschiedlichen Bestandesbedingungen erhobenen Punktwolken bietet Abbildung 162 (für eine Darstellung der verschiedenen SPZ, siehe auch Abbildung 133). Hier sind die mit ULS (oberste Reihe), ALS (mittlere Reihe) und UAS-P (unterste Reihe) aufgenommenen / errechneten Punkte entlang der Profilschnitte durch ausgewählte *pilot subsets* dargestellt. Die linke Reihe von Plots stellt den Schnitt durch das Zentrum von SPZ 25 dar, wie oben beschrieben einem laubwalddominierten, geschlossenen Bestand, der *leaf-off* mit allen Methoden erhoben wurde. Während alle Methoden am SPZ 25 eine gewisse vertikale Differenzierung und zumindest teilweise Messungen am Boden aufweisen, fällt die deutlich höhere Punktdichte und ausgeglichene vertikale Verteilung der ULS-Punktwolke auf. Während bei UAS-P der Großteil der Punkte im Kronenbereich liegen und nur einzelnen Stämme erkennbar sind, ist mittels der ULS-Daten eine genaue Differenzierung der Bäume möglich, welche aufgrund der deutlich geringeren Punktdichte im ALS-Datensatz nur erahnt werden kann. In dem laubwalddominierten, aber mit *leaf-on* vom ULS kartierten SPZ 35 (Abbildung 162, mittlere Reihe) vermag aber selbst ULS nur mehr den Kronenbereich

und Punkte am Boden aufzunehmen – Punkte an den Stämmen oder Ästen treten dagegen nur sehr vereinzelt auf.

Noch deutlicher zeigt sich dies bei den UAS-P Daten, wo fast keine Datenpunkte im Plot sichtbar sind. Da die ALS-Daten im Frühjahr 2021 unter *leaf-off* Bedingungen aufgenommen wurden, ist auf diesem Plot auch noch eine gute vertikale Differenzierung der Punktwolke erkennbar. Im dichten, nadelwalddominierten SPZ 64 (rechte Reihe, Abbildung 162), erreicht ULS zwar immer noch eine gute Durchdringung des Bestandes und einige Punkte am Boden, aber auch hier können die Stämme nicht mehr ausreichend gut abgebildet oder erkannt werden; ähnlich schaut es in der ALS-Aufnahme aus, während mit UAS-P auch hier nur der Kronenbereich detektiert werden kann und weder Boden noch Stämme aufgenommen werden konnten.

Abbildung 162 Vertikale Verteilung der mit ULS (oberste Reihe), ALS (mittlere Reihe) und UAS-P (unterste Reihe) aufgenommenen / errechneten Punkte entlang der Profilschnitte

durch ausgewählte *pilot subsets* (SPZ 25 – laubwalddominiert, *leaf-off*; SPZ 35 – laubwalddominiert, *leaf-on*; SPZ 64 – nadelwalddominiert)



Ergänzend dazu sind in Abbildung 163 Profilschnitte der ULS-Daten durch alle sechs oben beschriebenen *pilot subsets* dargestellt, sowie in Abbildung 164 die prozentualen Höhenverteilungen der ULS-Punkte in diesen SPZ abgebildet. In der letzteren Abbildung wurden die Bodenwerte (0-1 m ü.G.) ausgeblendet, um differenzierter die Nicht-Boden-Punkte darzustellen. Hier zeigt sich, dass in dem offenen, *leaf-off* Mischwaldbestand (SPZ 25), die Geometrie der Bäume sehr gut erfasst werden kann und, ähnlich wie im oben beschriebenen SPZ 28, die Punkteverteilung über alle Höhenstufen des Bestands annähernd gleichmäßig verteilt ist. In dem stark von Nadelholz-Verjüngung und Unterwuchs dominierten SPZ 62, welches auch bei *leaf-off* befliegen wurde, zeigt sich auch eine sehr gute Durchdringung, da die ULS-Punkte auf alle Höhenstufen unterhalb von 7 m gut verteilt vorkommen. Die Punkteverteilung im *leaf-on* SPZ 32 zeigt ein deutliches Maximum in der vertikalen Verteilung im Bereich von 20-25 m ü.G. und geht danach fast auf 0 zurück. Dagegen im offenen *leaf-on* SPZ 35 werden sowohl der Jungwuchs als auch die höheren Bäume trotz Belaubung gut abgebildet, was durch eine gleichmäßige Höhenverteilung der ULS-Punkte bestätigt wird.

Im nadelwalddominierten SPZ 64 nimmt die Menge an Punkten zum Boden hin zwar nicht so dramatisch ab, wie im *leaf-on* Laubwald, aber auch hier macht sich die durch den dichten Bestand deutlich reduzierte Durchdringung mit ULS bemerkbar.

Abbildung 163 Vertikale Verteilung der ULS-Punkte entlang der Profilschnitte durch die sechs pilot subsets unter leaf-off (Grüntöne, oberste Reihe), und leaf-on Bedingungen (Rottöne, unterste Reihe), sowie im nadelwalddominierten Bestand (blau, unterste Reihe)

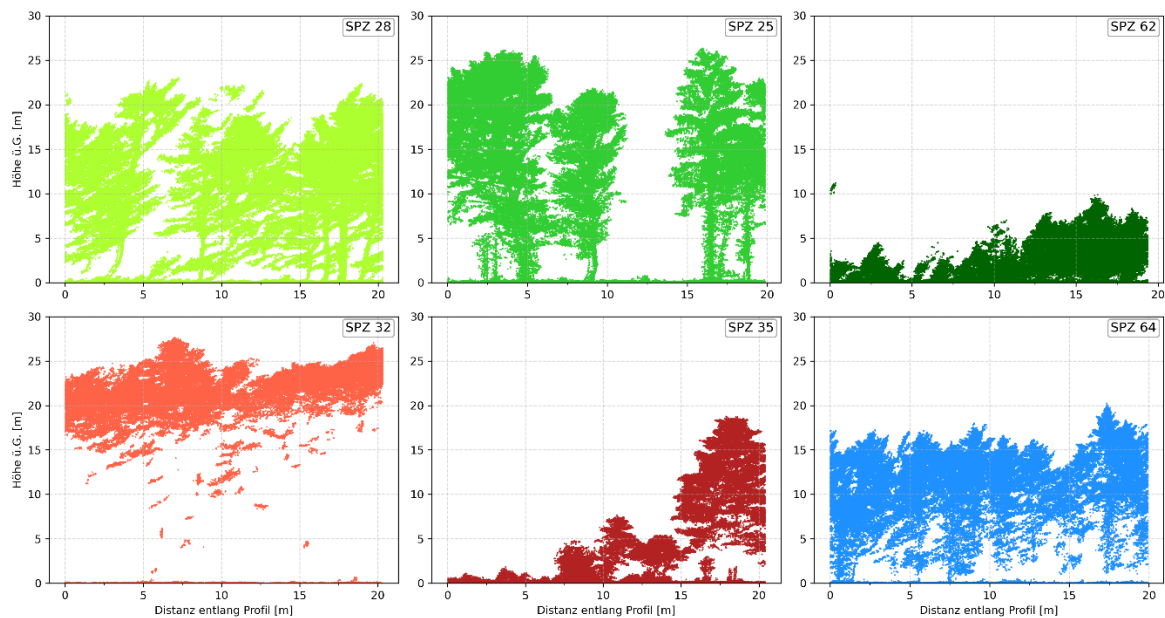
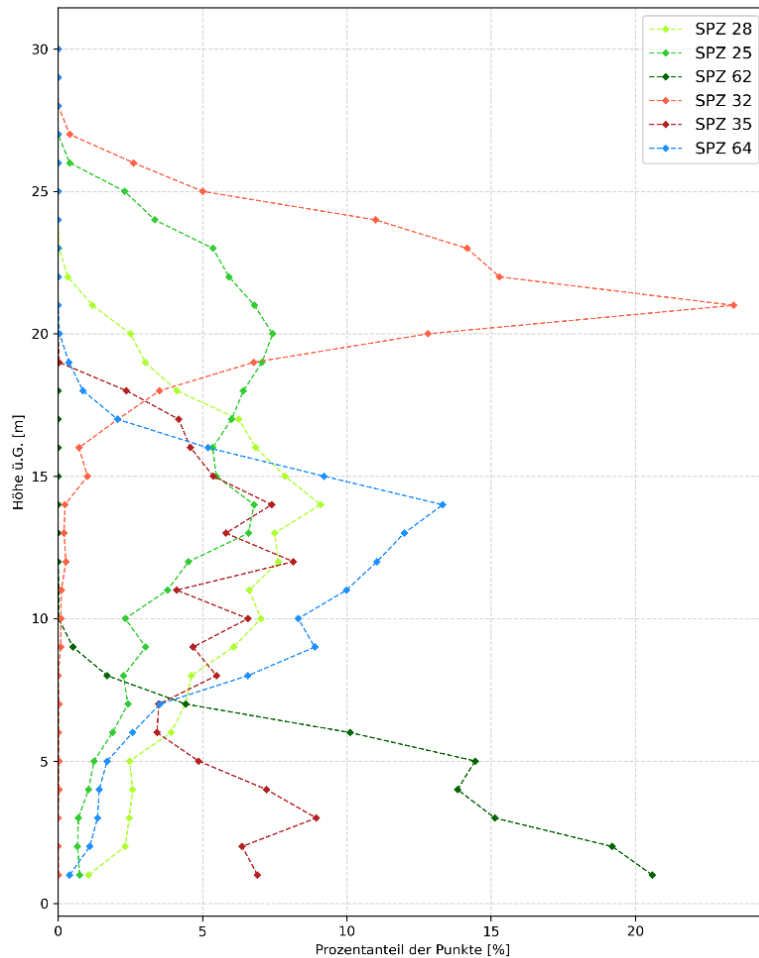


Abbildung 164 Verteilung der Häufigkeiten der Nicht-Boden ULS-Punkte mit der Höhe ü.G. entlang der in Abbildung 163 dargestellten SPZ (Farben ident wie Abbildung 163)



Der Vergleich der im MEZG-Rindbach eingesetzten, unterschiedlichen (drohnen-gestützten) Fernerkundungsmethoden zur Detektion dendrometrischer Parameter, lässt sich wie folgt zusammenfassen: Klassische photogrammetrische Verfahren (z.B. UAS-P) eignen sich, um den Kronenbereich mit einer (sehr) hohen Punktdichte zu erfassen. Weiterhin liefern die mit dieser Methode berechneten, sehr hochauflösenden Orthophotos eine gute Grundlage für die visuelle Interpretation und Klassifikation eines Bestandes. Aufgrund der geringen Durchdringung des Kronenbereichs, ist aber eine Detektion des Bodens und damit eine Berechnung von DGM und VHM, z.B. als Basis für die Ableitung von Baumhöhen, nur unter sehr günstigen Bedingungen (offene, *leaf-off* Bestände) möglich. Weiterhin ist die Photogrammetrie dadurch, dass sie eine passive, vom Sonnenlicht abhängige Fernerkundungsmethode darstellt, nur mit Einschränkungen in steilen, nordseitigen Bereichen, wie dem Untersuchungsgebiet im MEZG-Rindbach, einsetzbar.

Damit entfällt die Methode als Möglichkeit zur robusten, flächendeckenden Kartierung schutzwirkungsrelevanter Bestandesindikatoren im Schutzwald und wurde in der Folge im Rahmen dieser Studie dazu auch nicht in der weiteren Datenprozessierung und -auswertung berücksichtigt.

Diese Ergebnisse bestätigen den aktuellen Stand des Wissens in der Fachliteratur (z.B. Fassnacht et al., 2024; Ecke et al., 2022); neue KI-basierte Methoden scheinen eine Verbesserung klassischer photogrammetrischer Ansätze zu ermöglichen, v.a. in Hinblick auf die geometrische Vollständigkeit eines Baumes, bzw. des Kronenbereichs, der Menge der benötigten Eingangsdaten oder der Effizienz der Berechnung einer verdichteten Punktwolke (z.B. Neural Radiance Fields Methode – siehe Huang et al., 2024; Castorena, 2024). LiDAR-gestützte Verfahren (ULS & ALS) bieten, vor allem unter günstigen Bedingungen (*leaf-off*), sehr weitreichende und akkurate Möglichkeiten sowohl den Kronenbereich als auch die darunter liegende Baum- und Strauchschicht, sowie den Boden mit hoher räumlicher Dichte abzutasten.

Die durchschnittlich 20-fache Menge an Messpunkten bietet dabei ULS gegenüber ALS auf Hang-Ebene einen deutlichen Vorteil und erlaubt eine maximale Durchdringung, auch bei dichten Nadelwaldbeständen. Allerdings stellen *leaf-on* Bedingungen auch für ULS eine starke Einschränkung dar, weswegen der Zeitpunkt der Datenerhebung im Schutzwald sehr kritisch ist. Weiterhin gibt es selbst bei dieser sehr hohen Punktdichte weitere Einschränkungen von ULS, was die Möglichkeit der Identifizierung von spezifischen schutzwirkungsrelevanten Indikatoren anbelangt, wie z.B. BHD. Ähnliches gilt für die (automatische) Identifikation von Totholz, insbesondere liegendes Totholz oder Stöcke unter dem Kronendach, sowie die Kartierung von Jungwuchs; zur Aufnahme dieser Indikatoren müssten die ULS-Aufnahmen um unterhalb des Kronenniveaus aufgenommene LiDAR-Daten (MLS oder TLS) ergänzt werden. Hier bestätigen die Ergebnisse dieser Studie ebenfalls die aktuelle wissenschaftliche Literatur (z.B. Nothdurft et al., 2024; Biener et al., 2018). Dem gegenüber stehen die robuste und flächendeckende Möglichkeit der Kartierung von Stammzahlen, Kronenbedeckungsgrad und Baumhöhe mit ULS, wie im folgenden Abschnitt dargestellt.

Müssen schutzwirkungsrelevante Indikatoren auf einer größeren Fläche (Einzugsgebiets-ebene oder regionaler Ebene) erhoben werden, stellen ALS-Daten zumindest für einen Teil der genannten schutzwirkungsrelevanten Indikatoren eine Alternative dar. In der Fachliteratur publizierte Ansätze, die auf eine Kartierung schutzwirkungsrelevanter Indikatoren abzielen, greifen dabei auf eine Kombination von ALS-Daten mit in-situ Messungen und daraus abgeleiteten allometrischen Funktionen zurück, um diese Lücke zu schließen (Moos et al.,

2025). Hier bieten auch hochauflösende, z.B. von Helikoptern aus aufgenommene ALS-Datenerhebungen, die Möglichkeit, die Lücke zwischen ALS und ULS zu schließen. Da diese Studie auf hochauflösende, drohnengestützte Daten fokussiert und die ALS-Daten keine ausreichend hohe Punktdichte für einen *bottom-up* Ansatz bieten, wurde auf eine detaillierte Darstellung der Resultate einer Prozessierung mit ALS im Rahmen dieses Berichts verzichtet.

Abbildung 165 zeigt einen Ausschnitt der Ergebnisse der *top-down* Kartierung für ein ausgewähltes *pilot subset* (SPZ 28). Neben dem der Schummerung des DOM überlagerten VHM (oben links), sind die identifizierten Baumspitzen und Kronenumrisse (oben rechts), sowie die kartierten Baumhöhen (unten links) dargestellt (jeweils mit dem UAS-Orthophoto im Hintergrund). Die Ergebnisse bestätigen, dass ULS durch die Perspektive von oben und die hohe Punktdichte eine sehr genaue Kartierung des Kronenbereichs und damit der Baumhöhen erlaubt. Die Identifikation der Einzelbäume durch die angewandte *top-down* Methode zeigt sehr plausible Resultate für Nadelbäume; bei Laubbäumen oder sich gegenseitig stark überlappenden Kronen verschiedener Baumarten ist die Bestimmung eines Einzelbaumes etwas weniger robust; bilden mehrere Stämme eine gemeinsame Krone, wie es im Feld öfter bei Buchen beobachtet wurde, ist nur bei deutlichem Höhenunterschied zwischen den Einzelkronen eine Unterscheidung möglich. Die Ergebnisse der Abgrenzung der Kronenumrisse zeigt, dass mit der angewandten Methode fast alle zur Verfügung stehenden Bereiche des VHM segmentiert werden; wie aus dem Vergleich zum nebenstehenden DOM/VHM ersichtlich, werden dabei auch Freiflächen, wie die in der Bildmitte, zum Kronenbereich hinzugerechnet. Damit ist mit einer Überschätzung des Kronendeckungsgrads bei *top-down* zu rechnen (siehe unten).

Abbildung 165 Ergebnisse der top-down Prozessierung von pilot subset SPZ 28; VHM und Schummerung des DOM (oben links); Baumspitzen (blaue Punkte) und Kronenumrisse (grüne Linien) (oben rechts); ermittelte Baumhöhen - orange Punkte skaliert nach den in der Legende dargestellten Symbolgrößen (unten links)

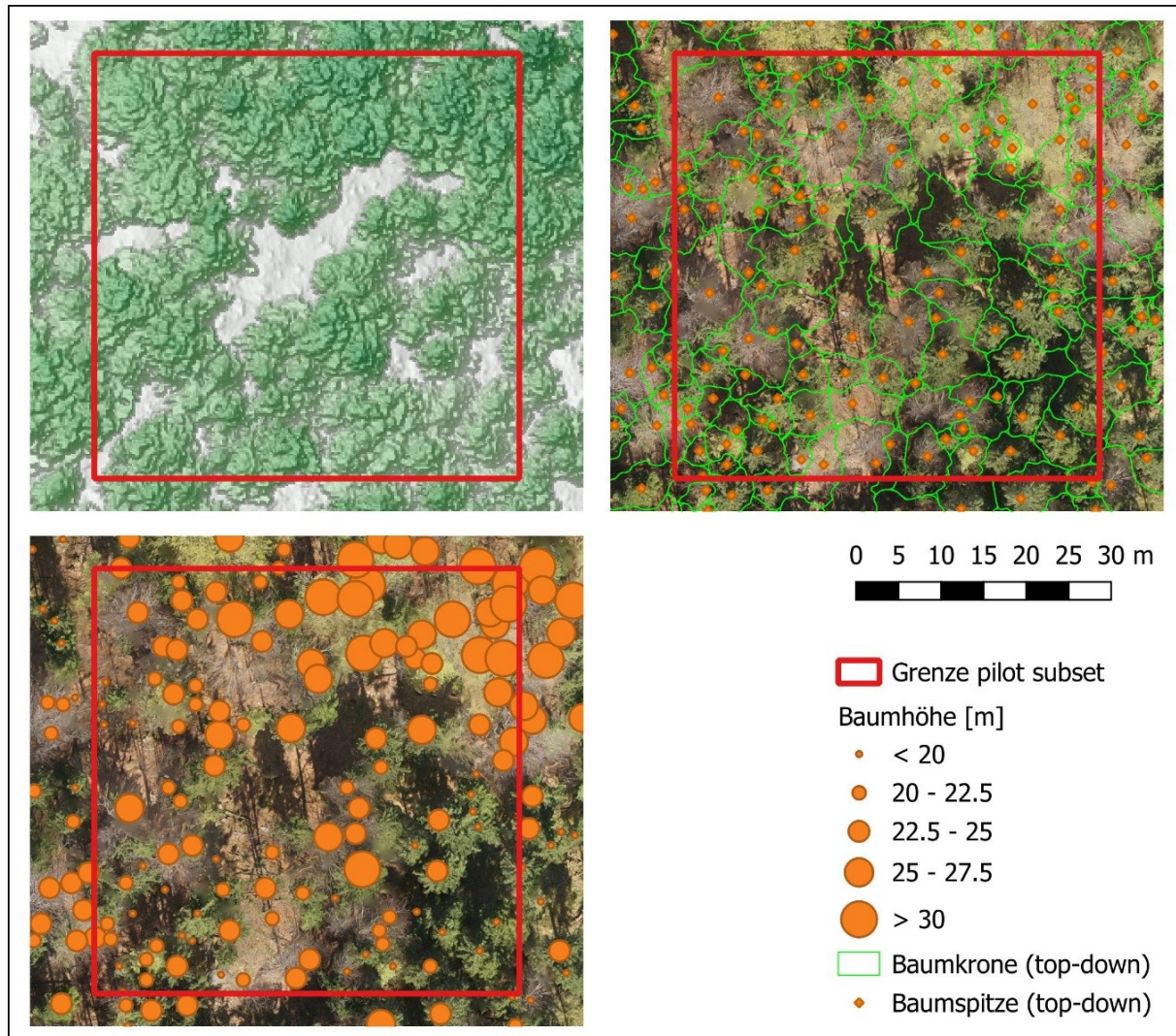


Abbildung 166 zeigt die Ergebnisse der *bottom-up* Prozessierung beispielhaft am *pilot subset* SPZ 62. Dargestellt sind die errechneten *skeletons* (orange Linien), sprich die aus der ULS-Punktwolke abgeleitete Baumgeometrie (oben links); die Stammposition (blaue Punkte) und die aus der Umhüllenden (engl. *convex hull*) der *skeletons* annäherungsweise abgeleiteten Kronenumrisse (blau straffierte Polygone) (oben rechts); im Hintergrund jeweils die UAS-Orthophotos; schließlich ist im unteren Teil der Abbildung eine 3D-Ansicht der *pipes* der identifizierten Bäume dargestellt – Blickrichtung nach Süden, eingefärbt nach modelliertem Umfang von Stämmen / Ästen (rot – großer / blau – kleiner Umfang), ergänzt um die nach Intensität in Grautönen dargestellten ULS-Punktwolke. Besonders die untere

Teilabbildung illustriert sehr gut, dass mit ULS-Daten leaf-off Bäume sehr detailliert kartiert und dargestellt werden können.

Durch eine Segmentierung der ULS-Punktwolke, ist die Ableitung der Baumgeometrie vollständig möglich und in verschiedenen Ansichten darstellbar. Anhand dieser Modelle ist die Kalkulation der im Abschnitt Methode beschriebenen dendrometrischen Indikatoren möglich (z.B. Anzahl, Austrittswinkel und Position, sowie modellierte Dicke der Äste, modelliertes Volumen des Stammes und der Äste), von denen die wenigsten aber im gegenständlichen Fall relevant sind. Die beiden oberen Teilabbildungen zeigen aber auch, dass die *bottom-up* Methode große Teile der im *pilot subset* vorhandenen Koniferen nicht detektieren und damit die Anzahl an Bäumen massiv unterrepräsentiert ist. Der Kronenumfang und damit der Kronenbedeckungsgrad der kartierten Bäume hingegen können sehr viel genauer als bei der *top-down* Methode dargestellt werden; ähnlich können auch mehrere Stämme pro Krone detektiert und deren Geometrie modelliert werden.

Abbildung 166 Ergebnisse der *bottom-up* Kartierung von *pilot subset* SPZ 62; *skeletons* (orange Linien) der identifizierten Bäume (oben links); Stammpositionen (blaue Punkte) und annäherungsweise bestimmter Kronenumriss (blau straffierte Polygone) dieser Bäume (oben rechts) – im Hintergrund jeweils die UAS-Orthophotos; 3D-Ansicht der *pipes* der identifizierten Bäume von Norden, eingefärbt nach modelliertem Umfang von Stämmen / Ästen (rot – großer / blau – kleiner Umfang), ergänzt um die nach Intensität in Grautönen dargestellten ULS-Punktwolke (unten)

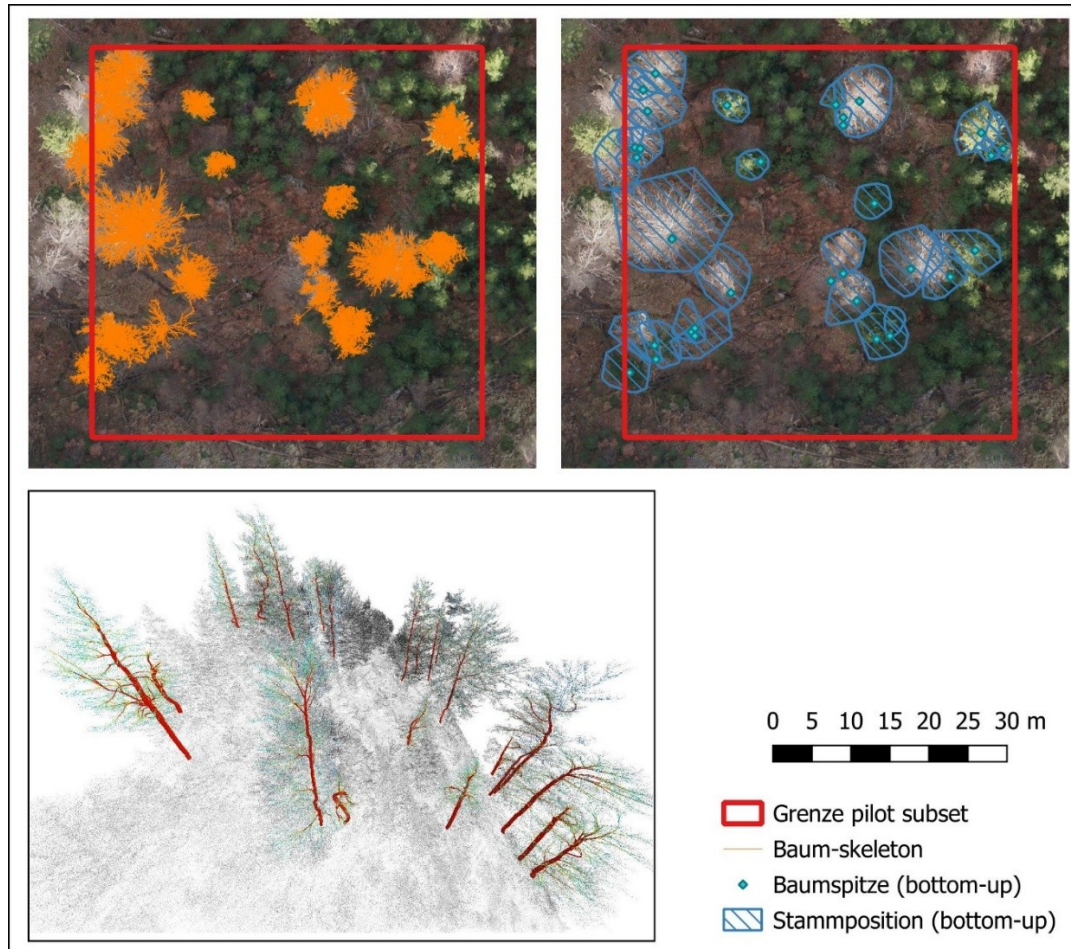


Abbildung 167 zeigt zusammenfassend für die *pilot subsets* die mittels *top-down* (blaue Punkte) und *bottom-up* (orange Punkte) abgeleiteten Baumspitzen, bzw. Stammmittelpunkte; die Anzahl pro *pilot subset* ist in Tabelle 41 dargestellt. In Summe identifiziert *top-down* deutlich mehr Einzelbäume als *bottom-up*. Dies ist besonders auffällig im offenen und geschlossenen *leaf-on* Laubwald, sowie dem offenen *leaf-off* Mischwald und dem Nadelwald-dominierten Teilgebiet (SPZ 35, 32, 62 & 64). Einzig im *leaf-off* Mischwald und Laubwald werden mehr Einzelbäume durch *bottom-up* kartiert. Dies wirkt sich in der Folge auch auf die errechnete mittlere Stammzahl / ha aus, die für *top-down* zwischen 220 und 740 liegt (SPZ 64 und 32), für *bottom-up* Werte zwischen 0 und 510 erreicht (SPZ 28 und 32).

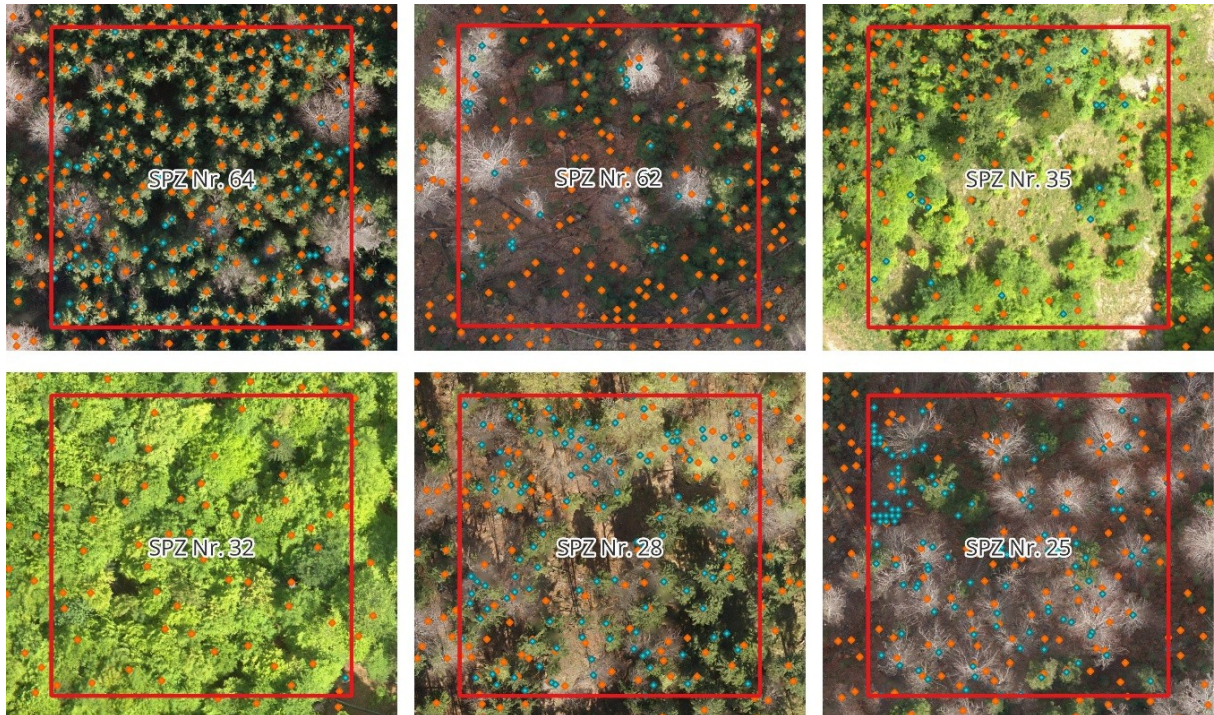
Wie bereits beschrieben, ist *bottom-up* auf das Vorhandensein einer hohen Punktdichte im Stammbereich angewiesen, um einen Baum als solches zu identifizieren.

Bei einem belaubten Kronenbereich oder einem dichten Nadelwaldbestand ist die Durchdringung von ULS massiv reduziert, so dass im Extremfall nur sehr wenige Punkte unter dem Kronenniveau aufgezeichnet und entsprechend keine oder wenige Bäume kartiert werden können. Im Gegensatz dazu werden unter *leaf-off* Bedingungen ähnlich viele oder sogar mehr Bäume durch *bottom-up* als durch *top-down* identifiziert; somit ist die mittlere Stammzahl pro Hektar auf diesen Flächen zwischen den beiden Methoden besser vergleichbar (SPZ 28 & 25). Nachdem *top-down* mittels der Kronengeometrie die Identifikation von Bäumen durchführt, ist deren Vollständigkeit und Lagegenauigkeit vor allem in Nadelwaldbeständen hoch; auch in Misch- oder Laubwaldbeständen liefert *top-down* eine robustere und vollständigere Identifikation von Einzelbäumen, auch wenn, wie in der Literatur beschrieben, diese Methode die Anzahl von Bäumen systematisch unterschätzt (Bouvier et al., 2015; Petersen et al., 2007).

Der deutliche Unterschied in der Anzahl detektierter Bäume zwischen *top-down* und *bottom-up* hat auch Auswirkungen auf die anderen schutzwirkungsrelevanten Parameter: Bei der mittleren Bestandeshöhe liegen die Werte im altersmäßig homogenen Nadelwaldbestand (SPZ 64) relativ nah beieinander (16,6 und 14,8 m). Die größten Unterschiede (im Schnitt ca. 6 m) finden sich im offenen, *leaf-off* Mischwald pilot subset (SPZ 62). Wie bereits oben beschrieben, ist die Vorgehensweise zur Abgrenzung des Kronenumfanges und damit des Kronendurchmessers sehr unterschiedlich zwischen *bottom-up* und *top-down*; dies spiegelt sich in den in Tabelle 41 dargestellten Resultaten wider: Der mittlere Kronendurchmesser liegt bis zu 5,5 m auseinander (SPZ 32) und hat auch im besten Fall (SPZ 28 oder 25) immer noch eine Abweichung von ca. 2 m.

Noch deutlicher wird der Unterschied beim Kronenbedeckungsgrad, wo im Extremfall (SPZ 32) die Werte zwischen 0 und 100% liegen. Da *bottom-up* hier nur einige wenige Bäume identifizieren kann in einem im Orthophoto deutlich erkennbaren, geschlossenen Bestand, liefert *bottom-up* hier keine sinnvollen Werte. Auch in anderen *pilot subsets*, wo aufgrund der offenen Bestandesstruktur deutlich mehr Bäume von *bottom-up* identifiziert werden (z.B. SPZ 62 oder 35), scheinen bei einem visuellen Abgleich mit dem UAS-Orthophoto die mit *bottom-up* errechneten Kronenbedeckungsgrade eher zu gering (28%, respektive 33%).

Abbildung 167 Gegenüberstellung der Ergebnisse der beiden Methoden zur Ermittlung dendrometrischer Indikatoren für die *pilot subsets*; errechnete Baumpositionen aus *bottom-up* (blaue Punkte) und *top-down* (orange Punkte)



Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass *bottom-up* unter günstigen Aufnahmebedingungen (*leaf-off*, Kreuzflug, offene Bestandesstruktur, ggf. ergänzt um MLS/TLS) sehr detaillierte Resultate bei der Ableitung schutzwirkungsrelevanter Merkmale auf Hang-Ebene liefern kann; diese können bis zu einer vollständigen geometrischen Beschreibung von Einzelbäumen reichen. Können diese Bedingungen aber nicht gewährleistet werden, liefert die *top-down* Methode robustere, wenn auch weniger detaillierte Ergebnisse, die im Mittel die Anzahl von Bäumen unterschätzt und vor allem Nachteile bei mehrschichtigen Beständen mit sich bringt.

Tabelle 41 Übersicht der Ergebnisse der top-down (TD) und bottom-up (BU) Prozessierung in den pilot subsets; dargestellt sind die Anzahl der mit beiden Methoden detektierten Bäume, die mittlere Stammzahl (MSZ), die mittlere Baumhöhe (MBH), der mittlere Kronendurchmesser (MKD), sowie der Kronenbedeckungsgrad (KBG) – jeweils gemittelt auf die 50×50 m pilot subsets, bzw. auf die Werte pro Hektar (für MSZ)

SPZ-ID	Bestand	Anzahl Bäume [n]		MSZ [n/ha]		MBH [m]		MKD [m]		KBG [%]	
		TD	BU	TD	BU	TD	BU	TD	BU	TD	BU
64	Nadelwald, geschlossen	184	83	740	330	16,58	14,79	3,99	7,98	98,4	87,7
62	Mischwald, offen, leaf-off	126	33	500	130	9,3	15,24	4,59	6,83	98,5	27,7
35	Laubwald, offen, leaf-on	93	19	370	80	11,67	14,09	5,33	8,67	93,3	33
32	Laubwald, geschlossen, leaf-on	56	1	220	0	25,39	19,8	7,12	1,65	99,5	0
28	Mischwald, leaf-off	107	128	430	510	22,51	18,69	5,01	6,84	99	78,4
25	Laubwald, geschlossen, leaf-off	99	123	400	490	19,27	14,51	5,18	7,02	98,9	76,4

Vergleich der Erhebungsmethoden ULS und CSP7

Die Bestockungsdichte ist ein zentraler Parameter zur Bewertung der Schutzwirkung eines Waldes gegenüber Naturgefahren. Ein häufig verwendetes Maß ist die Kronendeckung, die über den Überschirmungsgrad quantifiziert werden kann. Da jedoch ein identischer Überschirmungsgrad mit unterschiedlichen Bestockungsdichten einhergehen kann, sollten zur Beschreibung der Bestandesdichte ergänzend weitere Indikatoren herangezogen werden, wie die Stammzahl (Stamm- bzw. Baumdichte), die Grundfläche (für die Informationen zum BHD notwendig sind) oder die Stammdistanz.

Ein Vergleich der Fernerkundungsmethoden *Bottom-up* und *Top-down* mit den in-situ Referenzdaten für diese Parameter wurde innerhalb der sechs Pilotparzellen unter Verwendung des starren 7 m Probekreis (CSP7) durchgeführt (Abbildung 168). Die Ergebnisse zeigen methoden- und bedingungsabhängige Unterschiede in der Baumdetektion:

- **Laubwald, geschlossen, leaf-off (SPZ 25):**

Beide Auswertemethoden überschätzten die Anzahl der Bäume im Vergleich zu den

in-situ Daten um 1 Baum bei *top-down* und 3 Bäume bei *bottom-up*. Die Einheit Bäume pro Hektar wird häufig zur Bewertung von Bestandesstruktur und für Landschaftsanalysen verwendet. Hochgerechnet auf einen Hektar entspricht dies einer Überschätzung von 65 Bäumen (*top-down*) bzw. 195 Bäumen (*bottom-up*). Solche Abweichungen können zu einer Überschätzung der Bestandesdichte führen und damit ungenaue Eingangsdaten für Schutzwaldmodelle (z.B. zur Bewertung der Lawinen- oder Steinschlaggefährdung) liefern.

- **Laubwald, geschlossen, leaf-on (SPZ 32):**

Die *top-down* Methode unterschätzte die Baumanzahl um 100 % es wurden nur 5 Bäume detektiert, während 15 Bäume in-situ gemessen wurden. Dies weist auf eine erhebliche Untererfassung unter dichter Belaubung hin.

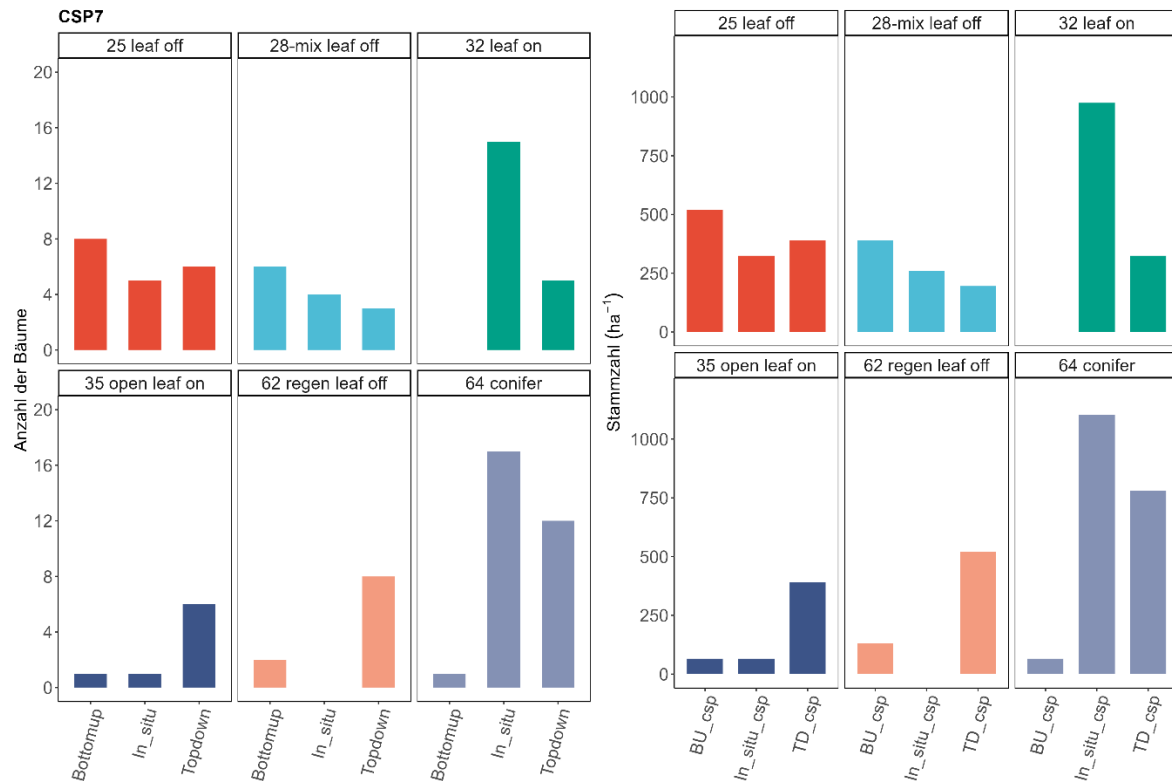
- **Dichter Nadelwald (SPZ 64):**

Beide Methoden unterschätzen die Anzahl der Bäume, wobei *top-down* 5 Bäume und *bottom-up* 16 Bäume weniger erfasste. Die geringe Durchdringung des LiDAR-Signals durch dichte Nadelbaumkronen beeinträchtigt vermutlich insbesondere die *bottom-up* Erfassung.

- **Laubwald, offen, leaf-off (SPZ 35):**

Die *bottom-up* Methode stimmte nahezu exakt mit den in-situ Daten überein, während die *top-down* Methode die Anzahl der Bäume um den Faktor zwei überschätzte, was auf eine mögliche Übersegmentierung in lichtdurchlässigen Kronendächern hindeutet.

Abbildung 168 Vergleich der Baumanzahl (links) und Stammzahl pro Hektar (rechts) zwischen den beiden ULS-Methoden (bottom-up und top-down) sowie der Referenzstichprobe (in-situ) für den CSP7 m Probekreis in den sechs Pilotparzellen



Kronendeckung und Bestandeshöhe sind auch zentrale Parameter zur Beurteilung der Schutzwirkung von Wäldern. Die Erfassung von Kronenmerkmalen wie Kronenbreite und Kronenlänge ist im Gelände jedoch zeitaufwendig und besonders in komplexem, unzugänglichem Gelände schwierig umzusetzen. Aus diesem Grund wurden diese Parameter in den terrestrischen Stichproben nicht erfasst. Mithilfe der ULS-Daten war es hingegen möglich, die individuellen Kronenflächen sowohl für die *bottom-up*, als auch die *top-down* Methode automatisiert zu berechnen. Dies wurde für insgesamt 48 der 66 aufgenommenen Versuchsflächen durchgeführt (Abbildung 169).

Anschließend konnten die beiden Ansätze im Hinblick auf die mit den terrestrischen Stichproben-Methoden CSP7 und WZP4 erfassten Bäume verglichen werden. Für beide Methoden zeigte sich, dass die durchschnittliche Kronenfläche zwischen CSP7 und WZP4 ähnlich ausfiel:

bottom-up-Methode:

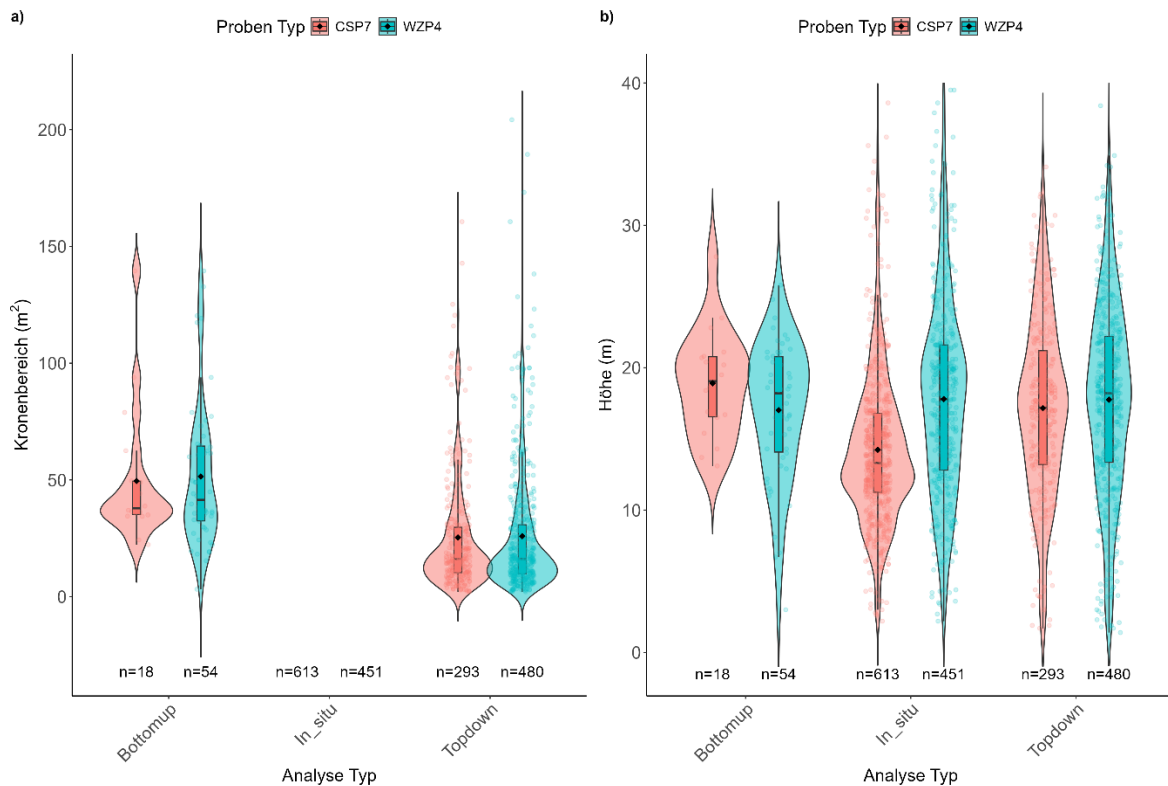
- CSP7: Ø 49,5 m²
- WZP4: Ø 51,4 m²

top-down-Methode:

- CSP7: Ø 25,2 m²
- WZP4: Ø 24,3 m²

Die *bottom-up* Methode berechnete somit eine durchschnittliche Kronenfläche, die in etwa doppelt so groß ist wie jene der *top-down* Methode. Dies deutet auf die oben beschriebenen methodischen Unterschiede in der Kronenabgrenzung hin, die bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden sollten. Für den Erhebungen mit CSP7 ergaben die Methoden *top-down* und *bottom-up* ähnliche durchschnittliche Baumhöhen von 17,2 m bzw. 18,9 m, während die in-situ-Daten eine geringere durchschnittliche Höhe von 14,4 m aufwiesen. Bei den WZP4-Daten lieferten hingegen alle drei Methoden vergleichbare durchschnittliche Baumhöhen, die zwischen 17,0 m (*top-down*) und 18,6 m (in-situ) lagen.

Abbildung 169 2. Vergleich der Kronenbereiche (a) und der mittleren Baumhöhen (b) zwischen den ULS-Methoden (bottom-up, top-down) und der terrestrischen Stichprobe (in-situ) für die Probentypen CSP7 und WZP4. Im Rahmen der In-situ-Aufnahmen wurden keine Kronendaten erfasst



Flächen mit erhöhter Suszeptibilität für Lawinenanbrüche (PRAs)

Die Anwendung der vier beschriebenen Methoden zur Identifikation von Flächen mit erhöhter Suszeptibilität für Lawinenanbrüche (Varianten A–D) führte zu neun unterschiedlichen PRA-Layern mit variierenden Gesamtflächen potenzieller Anbruchgebiete (Tabelle 42). Hauptursache für diese Unterschiede ist unter anderem, dass in einigen Methoden die Schutzwirkung des Waldes im Hinblick auf Lawinenanbrüche nicht berücksichtigt wurde (Varianten B-1 bis B-3 sowie D-1).

Tabelle 42 Vergleich der PRA-Layer im MEZG-Rindbach, aufsteigend sortiert nach ihrem prozentualen Anteil an der Gesamtfläche des MEZG (2.393,17 ha)

Methode für die Identifikation von PRAs	Pixel-größe [m]	Anzahl Anbruch-Pixel	PRA-Fläche [ha]	Anteil PRA-Fläche an MEZG-Fläche [%]
VARIANTE B-1 Basierend auf dem Projekt „GRAVIPROFOR“ - Dispositionsklasse 3	10×10	8989	89,89	3,76
VARIANTE A Gutachterlich	10×10	18776	187,76	7,85
VARIANTE D-2 Modellierung nach autoATES (P-VHM-PRAs)	10×10	23848	238,48	9,97
VARIANTE C-2 Kombination aus nDOM und Richtwerten aus NaiS (mind. 900 m ² Aggregate)	10×10	31843	318,43	13,31
VARIANTE D-3 Modellierung nach autoATES (LiDAR-VHM-PRAs)	10×10	31935	319,35	13,34
VARIANTE C-1 Kombination aus nDOM und Richtwerten aus NaiS (mind. 400 m ² Aggregate)	10×10	35958	359,58	15,03
VARIANTE B-2 Basierend auf dem Projekt „GRAVIPROFOR“ - Dispositionsklassen 3 und 2	10×10	58272	582,72	24,35
VARIANTE D-1 Modellierung nach autoATES (ohne Waldwirkungen)	10×10	105194	1051,94	43,96
VARIANTE B-3 Basierend auf dem Projekt „GRAVIPROFOR“ - Dispositionsklassen 3, 2 und 1	10×10	107652	1076,52	44,98

Während die Varianten B-3 und D-1, durch die Modellierung bzw. Abschätzung ohne den Einfluss der Schutzwirkung des Waldes, die Extreme repräsentieren (PRA-Anteile an der Gesamtfläche des MEZG-Rindbach: 43,96 % bzw. 44,85 %), liegen die Varianten C-1 und C-2, welche in Anlehnung an NaiS und unter Berücksichtigung des nDOMs zur Abschätzung der

wirksamen Bestandeshöhen erstellt wurden, sowie die Variante D-3 (PRA-Modellierung nach autoATES unter Berücksichtigung des LiDAR-VHM) mit Flächenanteilen zwischen 13,31 % und 15,03 % im mittleren Bereich der neun Varianten. Die Varianten C-1 und C-2 wurden jedoch aufgrund hoher Unsicherheiten verworfen. Ausschlaggebend dafür sind die große Spannbreite der in der Literatur angegebenen Schwellenwerte für anbruchverhindernde Vegetationshöhen von 2–5 m bzw. doppelter Schneehöhe. Wird nur die Dispositions-klasse 3 aus den Ergebnissen der GRAVIPROFOR-PRA-Modellierungen herangezogen, beträgt der Flächenanteil dieser PRAs am MEZG-Rindbach lediglich 3,76 %. Dies erscheint aufgrund der ausschließlichen Betrachtung großer Anbruchpotenziale jedoch unrealistisch.

Da das MEZG-Rindbach überwiegend bewaldet ist, sollte die Schutzwirkung des Waldes gegen Lawinenanbrüche bei der Modellierung der potenziellen Lawinensituation berücksichtigt werden. Die gutachterliche Variante A, welches die Anbruchschutzwirkung des Waldes miteinbezogen hat, wurde als plausibel bewertet. Neben der visuellen Abgrenzung von PRAs anhand des Luftbildes erfolgte auch eine Überlagerung mit der Hangneigung (28°–55°), wodurch typisches Lawinenanbruchgelände systematisch berücksichtigt wurde. Die Auswertung basierte auf einem Luftbild von 2021 mit 0,1 m Rasterauflösung, was eine präzise Interpretation der Vegetationsbedeckung ermöglichte. Der ermittelte PRA-Anteil an der Gesamtfläche des MEZG-Rindbach von 7,85 % könnte jedoch aufgrund der Nichtberücksichtigung potenzieller Anbruchflächen in Lawinensturzbahnen bzw. Transitgebieten leicht unterschätzt sein. Am plausibelsten ist die Variante D-3 (Modellierung nach autoATES mit LiDAR-VHM), um die Schutzwirkung der Waldstrukturen bestmöglich abzubilden. Für den Vergleich mit Variante D-3 sind jedoch auch die Variante D-2 (Waldstrukturen und insbesondere Überschirmungsgrad aus dem P-VHM abgeleitet) sowie die extreme Variante D-1 (ohne Berücksichtigung von Wald) interessant. In den folgenden Abbildung 170, Abbildung 171 und Abbildung 172 sind die Ergebnisse der drei mit Variante D modellierten PRA-Layer für das MEZG-Rindbach dargestellt. Die Ergebnisse der weiteren PRA-Layer der Varianten A–C sind im Anhang in den Abbildung 193Abbildung 194Abbildung 195Abbildung 196Abbildung 197Abbildung 198 zu finden.

Abbildung 170 PRAs (blau) modelliert mit Variante D-3 (Modellierung nach autoATES mit LiDAR-VHM). Flächenanteil potenzieller Anbruchpixel an der Gesamtfläche des MEZG-Rindbach: 13,34 %

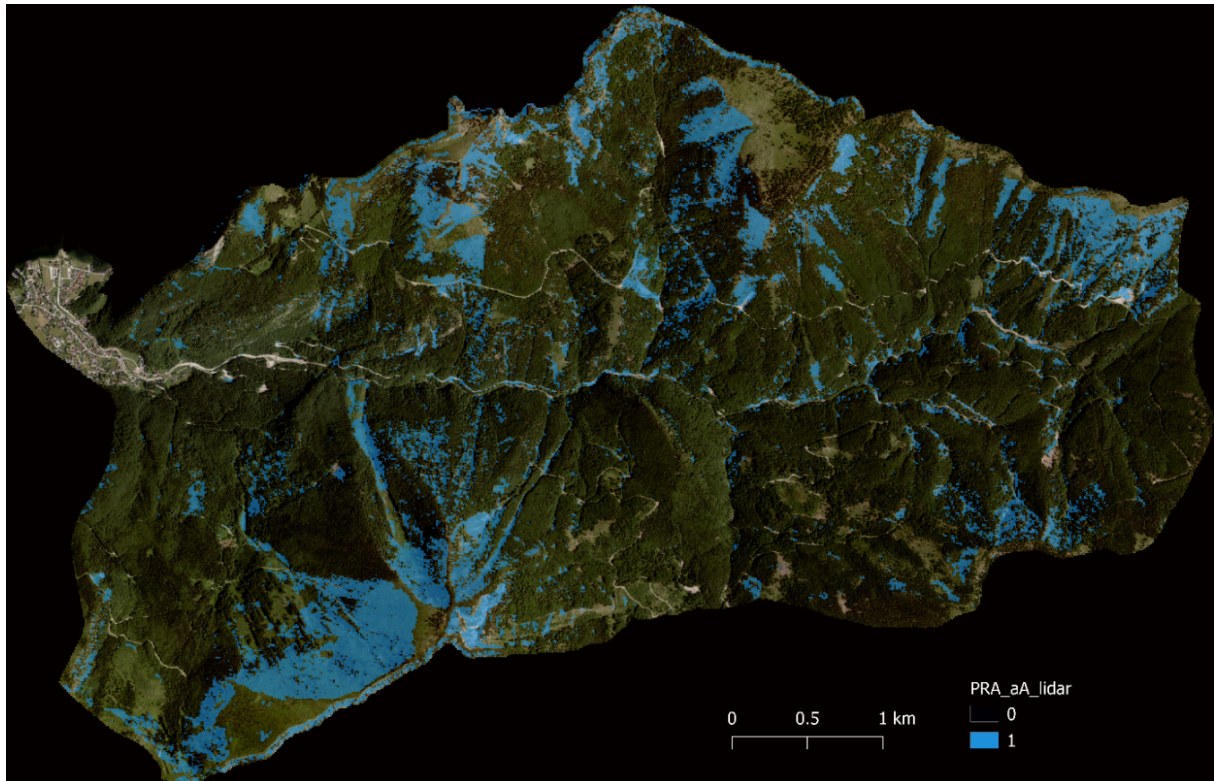


Abbildung 171 PRAs (blau) modelliert mit Variante D-2 (Modellierung nach autoATES mit P-VHM). Flächenanteil potenzieller Anbruchpixel an der Gesamtfläche des MEZG-Rindbach: 9,97 %

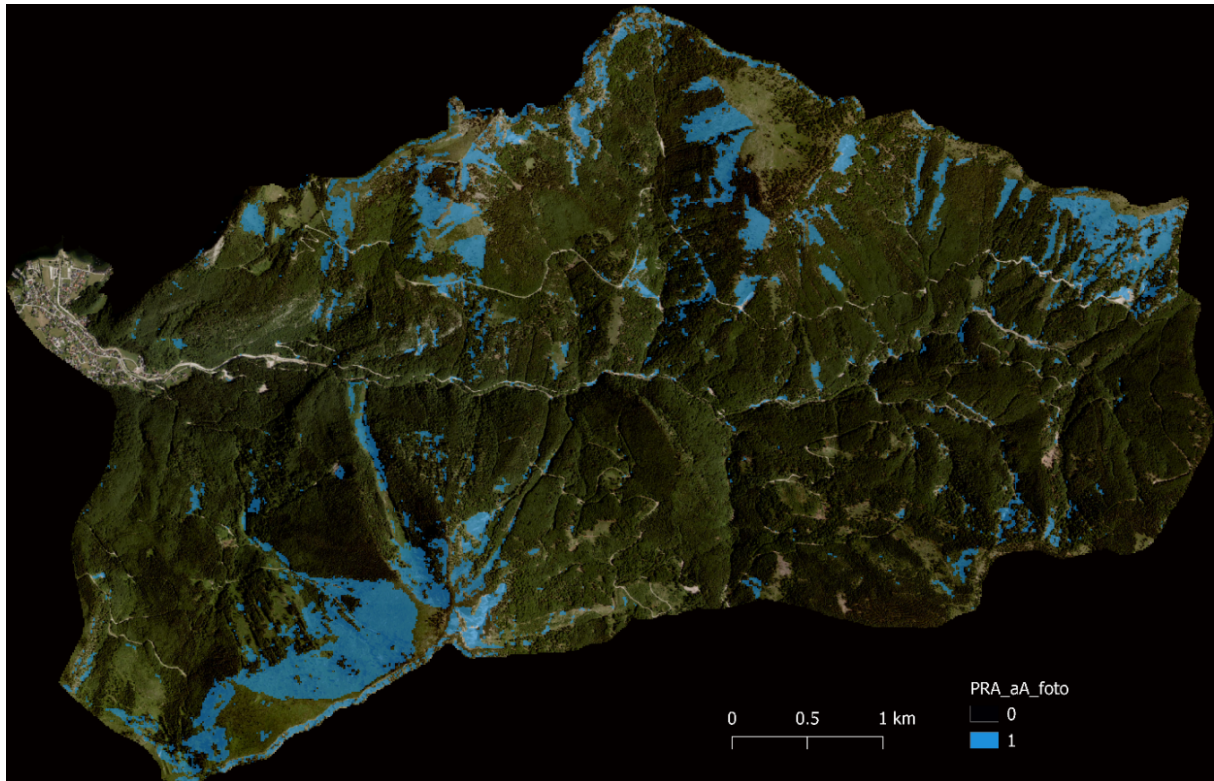
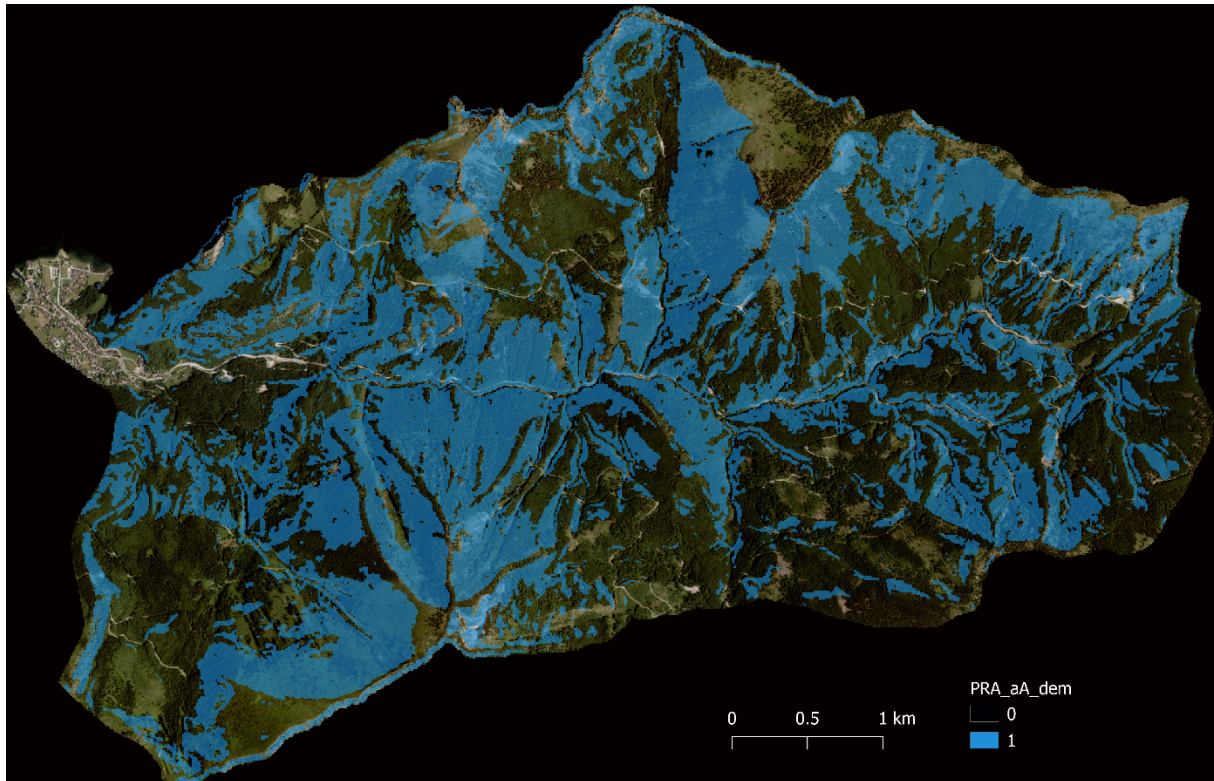
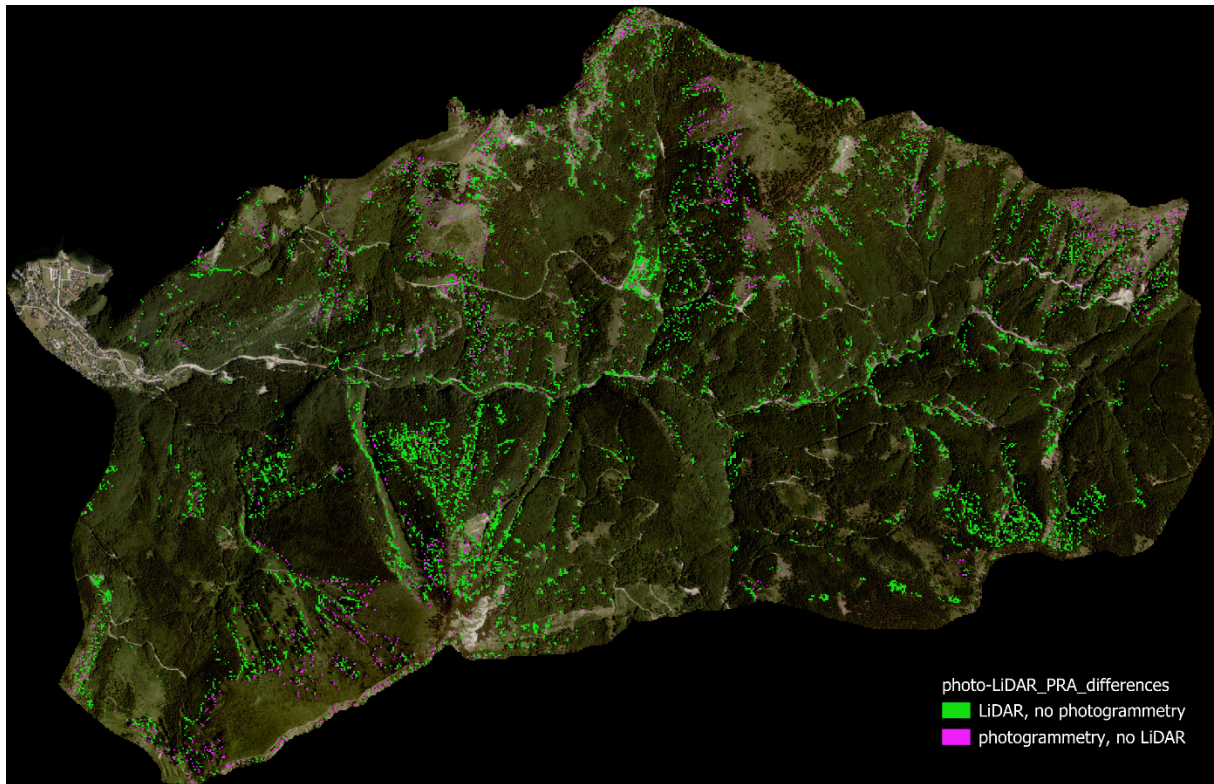


Abbildung 172 PRAs (blau) modelliert mit Variante D-1 (Modellierung nach autoATES ohne Berücksichtigung von Wald). Flächenanteil potenzieller Anbruchpixel an der Gesamtfläche des MEZG-Rindbach: 43,96 %



Wie erwartet unterscheiden sich die Ergebnisse der drei D-Varianten deutlich, abhängig davon, ob die Anbruchschutzwirkung berücksichtigt wurde und wie der in die Modellierung eingegangene Walddata erstellt wurde. Das PRA-Layer der Variante D-1, in der ausschließlich das Gelände berücksichtigt wurde, entspricht dem hypothetischen Fall einer vollständigen Entwaldung des MEZG-Rindbach. Die Varianten D-2 und D-3 unterscheiden sich hingegen um fast 4 % im Flächenanteil der PRAs an der Gesamtfläche des MEZG-Rindbach, je nachdem, ob der verwendete Walddata auf dem LiDAR-VHM oder dem P-VHM basiert (Abbildung 164). Dies unterstreicht die Bedeutung einer geeigneten und aktuellen Datengrundlage. Da die LiDAR-Daten speziell für das Projekt MEZG-Rindbach erhoben wurden, ist davon auszugehen, dass sie den aktuellen Zustand und damit die tatsächliche Waldsituation präzise abbilden, sofern seit der Datenerfassung keine größeren Störungen oder Veränderungen eingetreten sind.

Abbildung 173 Unterschiede zwischen den PRAs, modelliert nach autoATES unter Verwendung des LiDAR-VHM (Variante D-3) bzw. des P-VHM (Variante D-2). Grün: Pixel, die auf Grundlage des LiDAR-VHM, jedoch nicht auf Grundlage des P-VHM als PRA ausgewiesen wurden. Pink: umgekehrter Fall



Die größten Abweichungen zwischen den Modellierungsergebnissen nach autoATES in Abhängigkeit davon, ob das LiDAR-VHM oder das P-VHM als Grundlage für die eingeflossenen Waldinformationen verwendet wurde, treten auf:

- Auf Straßen: LiDAR-VHM weist mehr PRA-Zellen aus.
- An Waldrändern: LiDAR-VHM weist mehr PRA-Zellen aus.
- In Waldlücken: LiDAR-VHM weist mehr PRA-Zellen aus, vor allem an inneren oder äußeren Lückenrändern.
- An Rändern von Lawinenbahnen.
- In offenen Flächen mit Einzelbäumen: Wenn die Fläche als PRA modelliert wird, wird sie von beiden Methoden detektiert; während P-VHM auch Zellen mit Einzelbäumen einschließt, werden diese bei LiDAR-VHM nicht berücksichtigt.
- In steileren Hängen: LiDAR-VHM weist mehr PRA-Zellen aus.

Die Exposition hat insgesamt keinen signifikanten Einfluss, kann jedoch in Kombination mit der Hangneigung, etwa an Nordhängen, dazu führen, dass LiDAR-VHM deutlich mehr PRA-Pixel erfasst als P-VHM. Die Unterschiede lassen sich wahrscheinlich auf Faktoren der Datenerfassung und -verarbeitung zurückführen, wie Sensoreigenschaften, Wetterbedingungen bei der Aufnahme, Orthofotomosaikerstellung oder das Resampling der Walddaten von 0,5 m auf 10 m. Da die PRAs mit derselben Methode modelliert wurden und sich die Inputdaten nur in den Walddaten unterscheiden, lassen sich die beobachteten Abweichungen auf diese zurückführen. Die Erstellung des VHM und des daraus abgeleiteten Walddaten mit Informationen zum Überschirmungsgrad erfolgte in beiden Fällen gleich, weshalb die Unterschiede wahrscheinlich bereits bei der Ableitung des DOMs aus den Punktwolken entstehen. Wo LiDAR-VHM eine Zelle als PRA ausweist, P-VHM jedoch nicht, lagen die P-DOM-Werte vermutlich niedriger und fielen im weiteren Prozess der PRA-Modellierung unter die Schwelle von 5 m.

Schutzwälder befinden sich häufig in höheren Lagen auf steilen Hängen und unwegsamem Gelände. Diese Hänge sind oft potenzielle Anbruchgebiete für Lawinen, weshalb die methodenbedingten Unterschiede bei der PRA-Modellierung relevant sind. LiDAR erfasst Waldlücken präziser als photogrammetriebasierte Methoden, da der aktive Lasersensor auch kleine Lücken oder Wege erkennt, während Photogrammetrie nur größere Lücken erfasst und von den Lichtverhältnissen abhängig ist (Andersen, 2003; Gašparović et al., 2017). Liao et al. (2021) zeigen ähnliche Unterschiede zwischen DOMs: LiDAR erzeugt eine dreidimensionale Punktwolke, Photogrammetrie bildet nur die sichtbare Vegetationsoberfläche ab, was zu unterschiedlichen DOM-Zellenwerten führt. Zusätzlich beeinflussen technische Aspekte der Datenerfassung wie die Flughöhe die Ergebnisse. Die Wahl der Methode hängt schlussendlich von den verfügbaren Ressourcen und den angestrebten Analysezielen ab.

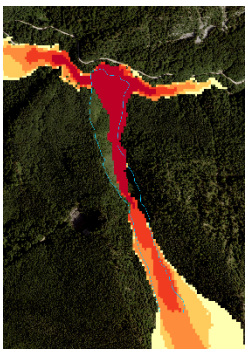
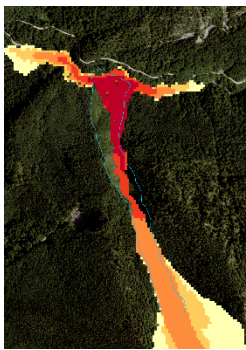
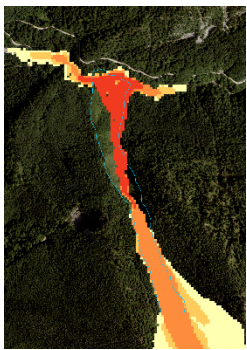
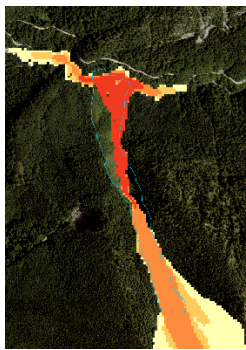
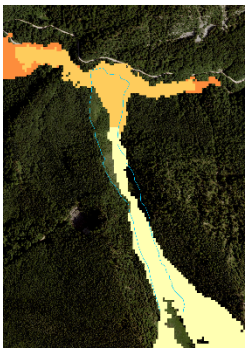
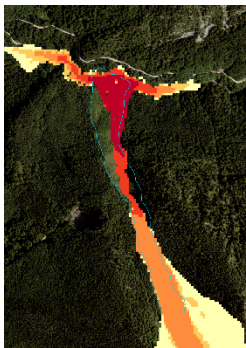
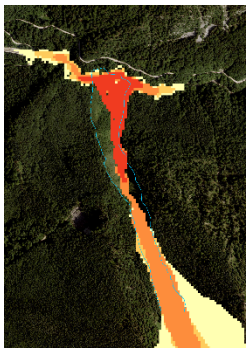
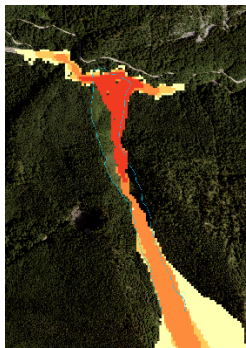
Modellierungsergebnisse der potenziellen Lawinensituation

Für die Simulation mit unterschiedlichen Modellparameter-Kombinationen (Tabelle 36) in com4FlowPy wurden die PRA-Layer, welche nach autoATES modelliert wurden (Varianten D, Abbildung 170, Abbildung 171, Abbildung 172), ausgewählt.

Die com4FlowPy-Simulation mit unterschiedlichen Modellparameter-Kombinationen führte für die drei ausgewählten Anbruchlayer (PRAs) zu teils deutlich variierenden potenziellen Lawinenprozessflächen. Die Parameterkombinationen, und insbesondere Werte für α , wurden auf Basis von Angaben aus der Fachliteratur bestimmt. Da jedoch die angenom-

menen α -Winkel sowie andere com4FlowPy-Modellparameter auch durch regionale Gegebenheiten, wie Geländeausprägung, Schneelage (Klima) oder Vegetation, beeinflusst werden, wurden weitere Simulationen für die Kalibrierung der com4FlowPy-Parameter mit den in Tabelle 36 aufgelisteten Parameterkombinationen durchgeführt und mit dem dokumentierten Lawinenereignis „Häuseleckgrabenlawine“ verglichen (Abbildung 174). Die Resultate unterstützten die Auswahl der Simulationsergebnisse, welche die potenzielle Lawinensituation im MEZG-Rindbach bestmöglich repräsentieren.

Abbildung 174 com4FlowPy-Simulationsergebnisse für die „Häuseleckgrabenlawine“ unter verschiedenen Modellparameterkombinationen (siehe Tabelle 22), abgeleitet aus dem LiDAR-VHM und P-VHM. Türkis: rekonstruierte Prozessfläche. Gelb–Rot: modellierte Prozessfläche und Intensität, dargestellt durch die Energielinienhöhe (z^{δ}); Gelb = geringe Intensität, Rot = hohe Intensität

	Parameterkombinationen			
Wald layer	Var1-withFor	Var2-withFor	Var3-withFor	Var4-withFor
Lidar-VHM				
P-VHM				

Wie in den obigen Abbildungen zu erkennen ist, ergeben sich bei der Modellierung der „Häuseleckgrabenlawine“ mit autoATES-PRAs unter Verwendung unterschiedlicher Parameter keine signifikanten Unterschiede in der Prozessfläche bzw. in der Ausbreitung des Prozesses. Abweichungen treten lediglich in wenigen Pixeln auf. Unterschiede sind hingegen in der Intensität des Prozesses erkennbar, die durch die Energielinienhöhe (z^δ) dargestellt wird: Gelb steht für geringe Intensität, Rot für hohe Intensität. Besonders auffällig sind die Intensitätsunterschiede bei der Parameterkombination Var1-withFor für relativ große Lawinen (Größe 4–5) mit hohen Intensitäten ($\alpha = 24^\circ$; $z_{lim}^\delta = 270$ m; $R_{stop} = 0,001$; $\Delta_{for,max}^\alpha = 23^\circ$) unter Verwendung des LiDAR-VHM und P-VHM. Dies unterstreicht, dass die Auswahl der Datengrundlage zur Ableitung von Waldstrukturen einen erheblichen Einfluss auf die Lawinensimulationen haben kann.

Am wahrscheinlichsten erscheint die Simulation mit der Parameterkombination Var3-withFor ($\alpha = 26^\circ$; $z_{lim}^\delta = 185$ m; $R_{stop} = 0,003$; $\Delta_{for,max}^\alpha = 26^\circ$), die auf McClung & Gauer (2018) sowie Markov et al. (2025) basiert und für die regionalen Gegebenheiten im MEZG-Rindbach ausgewählt wurde, unter Verwendung des LiDAR-VHM. Die com4FlowPy-Simulationen für das gesamte MEZG-Rindbach mit den beiden Parameterkombinationen Var1 und Var3 – jeweils unter Berücksichtigung des PRA-Szenarios D-3 (mit Waldwirkung, Var-withFor) sowie des PRA-Szenarios D-1 (ohne Waldwirkung, Var-noFor) – sind in den folgenden Abbildung 175,

Abbildung 176

Abbildung 177

Abbildung 178 dargestellt. Die Ergebnisse der weiteren com4FlowPy-Simulationen für alle PRA-D-Szenarien mit den Parameterkombinationen Var1 bis Var4, jeweils mit und ohne Berücksichtigung der Waldwirkung, sind im Anhang in den Abbildung 199Abbildung 200Abbildung 201Abbildung 202Abbildung 203Abbildung 204Abbildung 205 zu finden.

Abbildung 175 com4FlowPy-Simulationsergebnisse für PRA-Szenario D-1 (ohne Waldwirkung) mit der Modellparameter-Kombination Var1-noFor ($\alpha = 24^\circ$; $z_{lim}^\delta = 270$ m; $R_{stop} = 0,001$). Blau: PRAs; Gelb-Rot: modellierte Prozessfläche und Intensität, dargestellt durch die Energielinienhöhe z^δ .

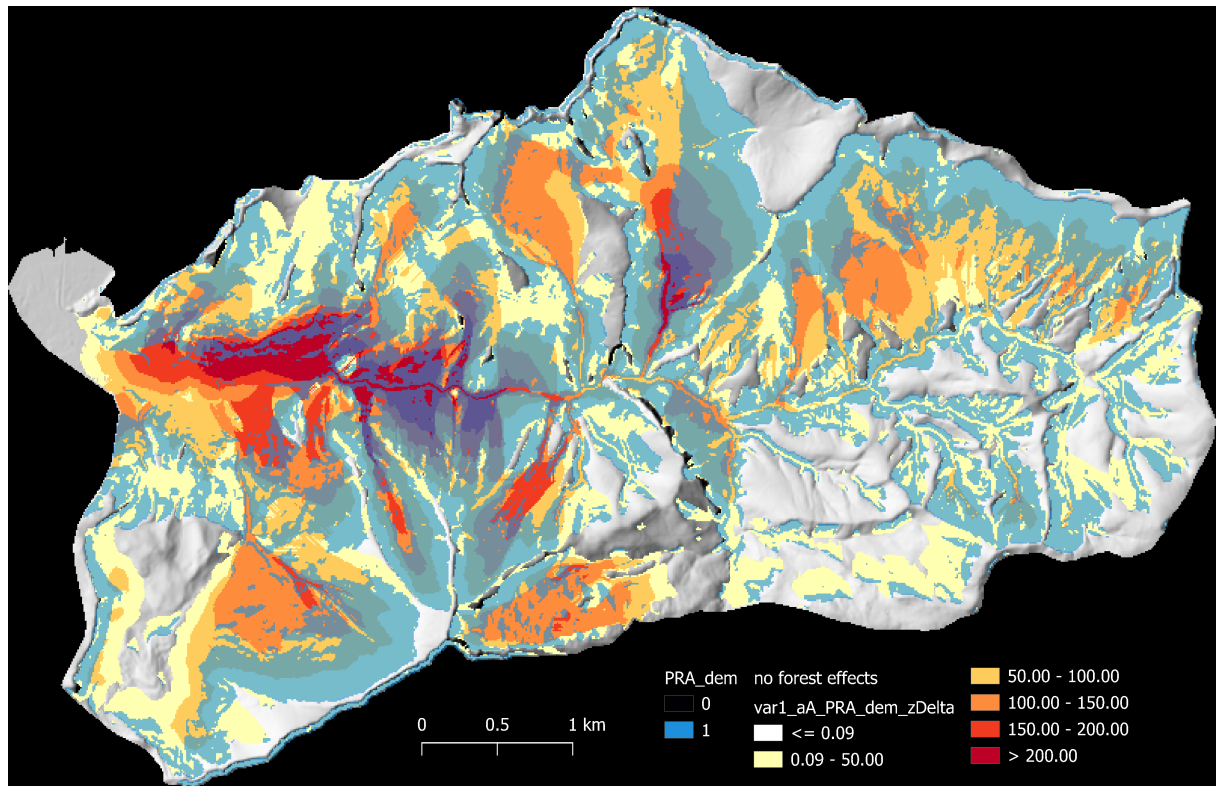


Abbildung 176 com4FlowPy-Simulationsergebnisse für PRA-Szenario D-3 (mit Waldwirkung) mit der Modellparameter-Kombination Var1-withFor ($\alpha = 24^\circ$; $z_{lim}^\delta = 270$ m; $R_{stop} = 0,001$; $\Delta_{for,max}^\alpha = 23^\circ$). Blau: PRAs; Gelb-Rot: modellierte Prozessfläche und Intensität, dargestellt durch die Energielinienhöhe z^δ

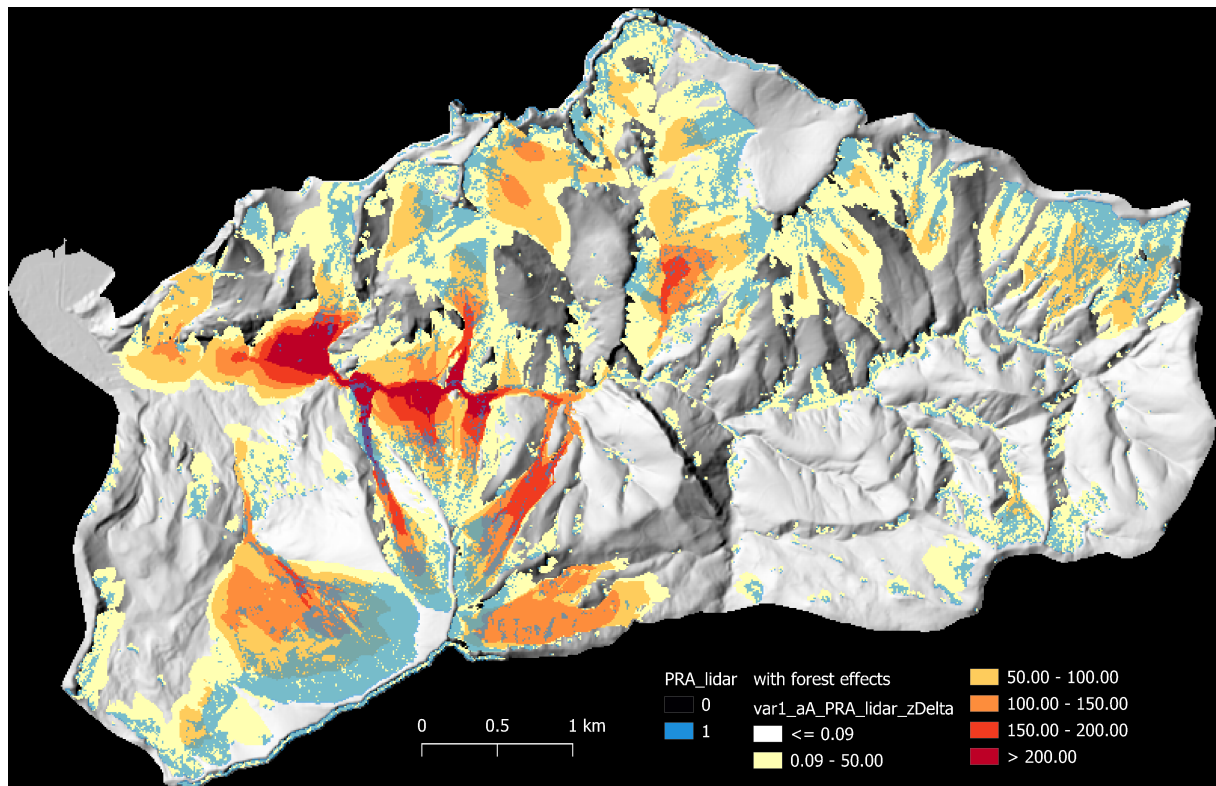


Abbildung 177 com4FlowPy-Simulationsergebnisse für PRA-Szenario D-1 (ohne Waldwirkung) mit der Modellparameter-Kombination Var3-noFor ($\alpha = 26^\circ$; $z_{lim}^\delta = 185$ m; $R_{stop} = 0,003$). Blau: PRAs; Gelb-Rot: modellierte Prozessfläche und Intensität, dargestellt durch die Energielinienhöhe z^δ

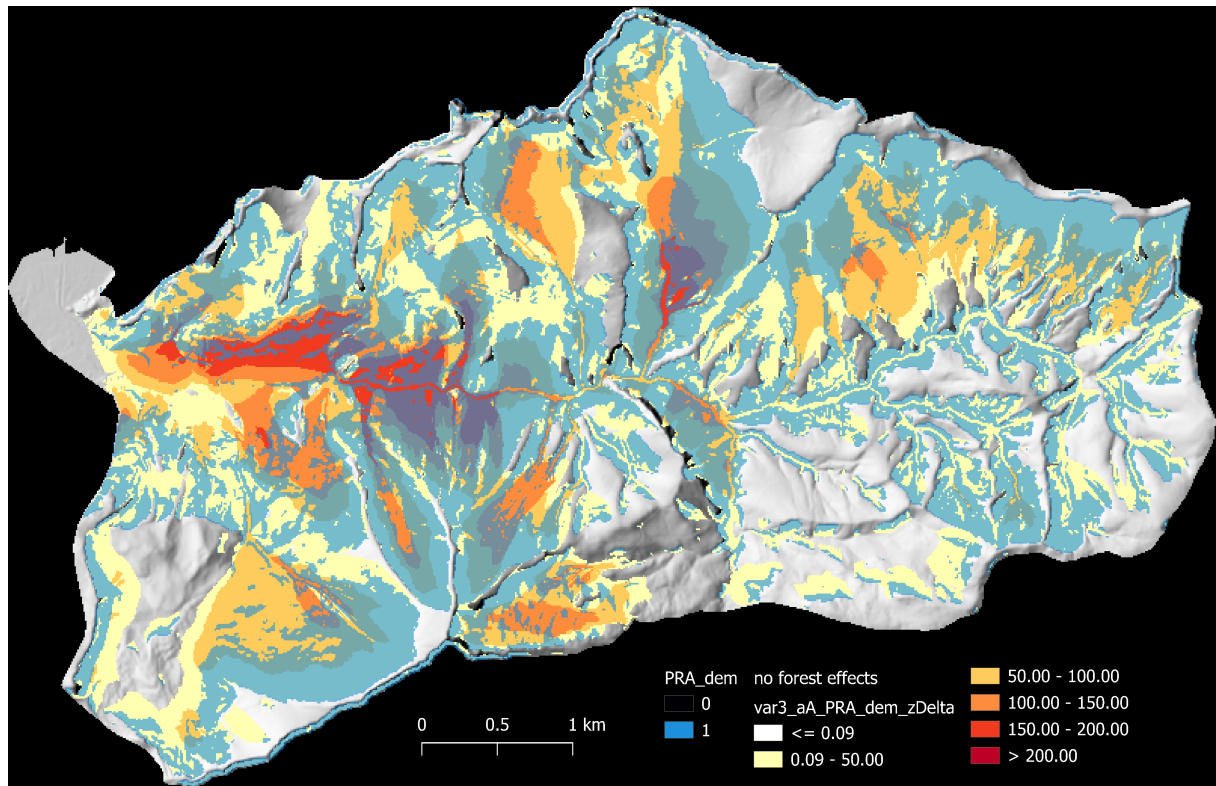
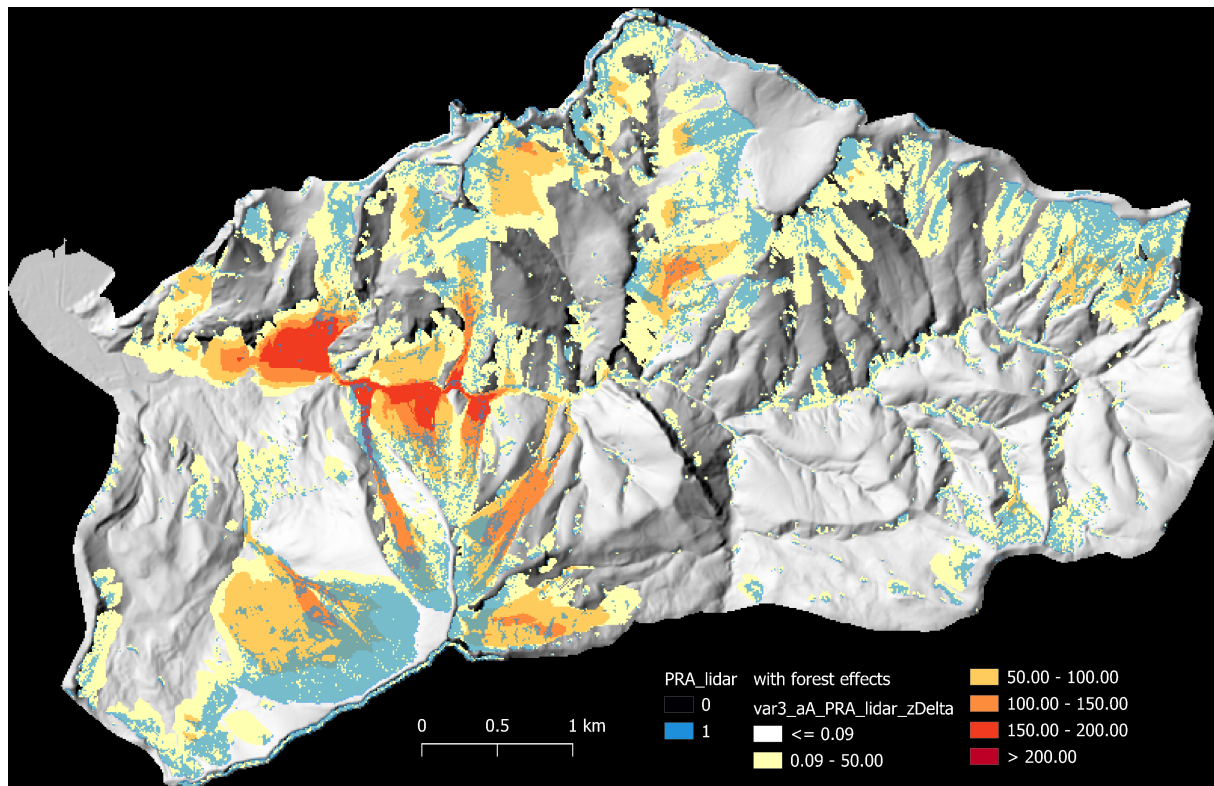


Abbildung 178 com4FlowPy-Simulationsergebnisse für PRA-Szenario D-3 (mit Waldwirkung) mit der Modellparameter-Kombination Var3-withFor ($\alpha = 26^\circ$; $z_{lim}^\delta = 185$ m; $R_{stop} = 0,003$; $\Delta_{for,max}^\alpha = 23^\circ$). Blau: PRAs; Gelb-Rot: modellierte Prozessfläche und Intensität, dargestellt durch die Energielinienhöhe z^δ



Wie erwartet zeigen die Simulationsergebnisse mit und ohne Berücksichtigung der Waldwirkung längere Lawinauslaufdistancen und eine höhere Intensität bei Szenarien mit höheren PRA-Anteilen und kleineren Auslaufwinkeln ($\alpha \leq 25^\circ$, com4FlowPy-Parameterkombinationen Var1 und Var2; z.B.: Abbildung 175,

Abbildung 176). Die Auslauflängen bei $\alpha \leq 25^\circ$ liefern ein tendenziell zu konservatives Bild der potenziellen Lawinensituation, was durch stumme Zeugen und Simulationen mit unterschiedlichen com4FlowPy-Parameterkombinationen der Häuseleckgraben-Lawine bestätigt wird (Abbildung 174). In vielen Fällen stoßen die modellierten Lawinen in die Vorfluter ein und „fließen“ anschließend über weite Strecken entlang der Gerinne. Daher wurden für die Darstellung der potenziellen Lawinensituation im MEZG-Rindbach die Szenarien D-1 (Var3-noFor, ohne Waldwirkung) und D-3 (Var3-withFor, mit Waldwirkung) mit einem Auslaufwinkel von $\alpha = 26^\circ$ sowie weiteren, für das MEZG-Rindbach angepassten Modellparametern ausgewählt (

Abbildung 177,

Abbildung 178). Durch die großflächige Bewaldung des MEZG-Rindbach sind die Unterschiede zwischen Szenarien mit (PRA-Layer D-2 und D-3) und ohne Waldbewirkung (D-1) signifikant: Mit Waldwirkung sind sowohl die Prozessflächen kleiner als auch die Intensität der modellierten Lawinen geringer.

Zusammenfassung

Ein Aufnahmeschlüssel für schutzwirksame Waldmerkmale wurde auf Basis terrestrischer Stichproben entwickelt. Dabei wurden im Teileinzugsgebiet 1.4 des MEZG-Rindbach in einem 100×100 m Raster die Bodenbedeckung, das Totholz, die Verjüngung ($\leq 1,3$ m) sowie die Strauch- und Baumschicht erfasst. Die Bodenbedeckung bestand zu 75 % aus Laub- und Nadelstreu, während das durchschnittliche Totholzvolumen 127 m³/ha betrug, wobei der Schwerpunkt auf einem Brusthöhendurchmesser (BHD) von 20–40 cm lag. Auf 86 % der Flächen wurde Verjüngung festgestellt, wobei die häufigste Baumart die Buche war (Klasse 3: $>1,30$ m, <3 cm BHD) mit einer Dichte von 1.300 Stück/ha.

Die Baumschicht zeigte in beiden Methoden (WZP4 und CSP7) ähnliche Grundflächen von 25–26 m²/ha mit einer Dominanz von Nadelbäumen, während in der Strauchschicht Laubbäume dominierten, was auf einen Übergang zu Laubwald hinweist. Der BHD war terrestrisch einfach messbar, konnte jedoch in ULS-Daten aufgrund der geringen Punktdichte nicht bestimmt werden. Die Kronenbedeckung ließ sich im Gelände nur schwer erfassen, konnte jedoch aus ULS-Daten effizient abgeleitet werden. ULS-Daten ermöglichten dank hoher Punktdichten und Durchdringung eine zuverlässige Erfassung dendrometrischer Parameter auf Einzelbaumebene in laubfreien Beständen, wobei die Ergebnisse gut mit den terrestrischen Daten übereinstimmten. In dichter Vegetation war die Aussagekraft jedoch eingeschränkt, und die Stammdetektion war teilweise unmöglich. Verbesserungen könnten durch höhere Punktdichten, beispielsweise durch Kreuzflüge, oder durch ergänzende TLS- bzw. MLS-Aufnahmen erzielt werden.

Flächen mit erhöhter Lawinenssuszeptibilität (PRAs) wurden durch vier Methoden bestimmt, wobei publizierte Algorithmen die plausibelsten Ergebnisse lieferten. Die potenzielle Lawinensituation im MEZG-Rindbach wurde mit com4FlowPy und verschiedenen Parameterkombinationen modelliert, wobei eine repräsentative Kombination ausgewählt wurde. Die Waldwirkung wurde dabei anhand von ALS-Daten integriert.

AP 7.2: Naturgefahren-Wildbach

Christian Scheidl, Johannes Hübl, Roland Kaitna,

Der Schwerpunkt des Arbeitspakets Naturgefahren-Wildbachprozesse liegt u.a. in der Kartierung aller Fließgewässerabschnitte inkl. perennierender und temporärer Fließwege und Erhebung potentieller Sedimenteinträge unter Berücksichtigung der Disposition aus dem Gerinne bzw. aus den Ufer-/Randbereichen. Weitere geplante Tätigkeiten sind die Erhebung relevanter hydraulischer Parameter und des Geschiebepotentials im Hauptgerinne. Zusätzlich wird eine Kartierung der Wildholzpotenziale entlang der Gerinne (Hauptbäche und Seitengräben) erfolgen. Ziel ist die Identifizierung von (kritischen) Flächen mit erhöhter Suszeptibilität für das Auftreten von Gerinne basierten Naturgefahrenprozessen.

Erhebung und Darstellung der Fließwege im MEZG-Rindbach

Das Gerinnenetz wurde hauptsächlich aus dem, von der WLV zur Verfügung gestellten, hochauflösenden digitalen Geländemodell erstellt und die Ordnungszahlen nach Strahler händisch im GIS zugeteilt. Lage der Gerinne und Ordnungszahlen wurden dann im Gelände evaluiert. Nachfolgende Tabelle 43 gibt die Länge der jeweiligen Gerinneabschnitte bezüglich ihrer Flussordnungszahl nach Strahler (1964) wieder.

Tabelle 43: Länge aller Gerinne nach ihrer Flussordnungszahl (Strahler, 1964).

Flussordnungszahl nach Strahler	Länge [km]
1	78,1
2	30,1
3	14,2
4	7,5
5 Hauptgerinne	7,5

Abbildung 179 zeigt das Gerinnenetz des MEZG-Rindbaches inklusiver Flussordnungszahlen nach Strahler (1964).

Abbildung 179 Gerinnesystem inklusive Flussordnungszahlen nach Strahler (1964) des gesamten MEZG-Rindbach.

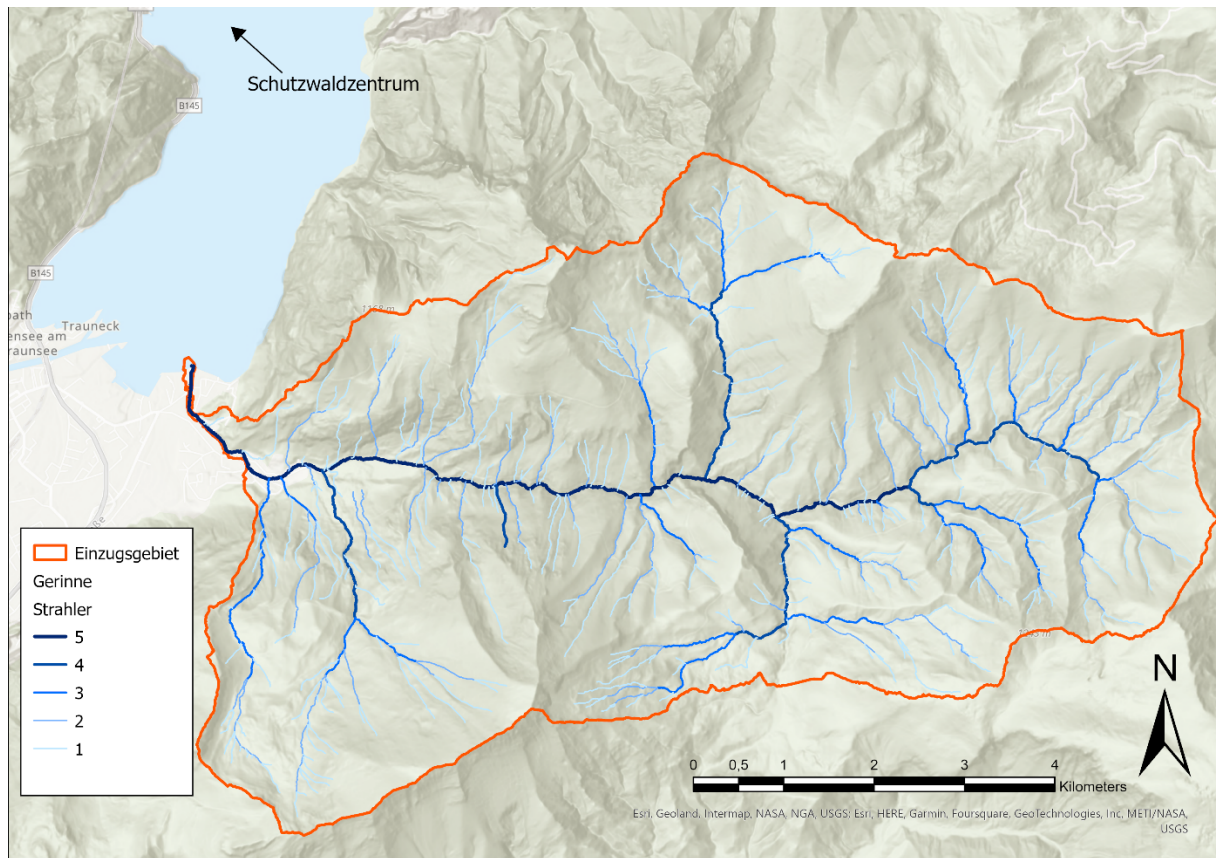


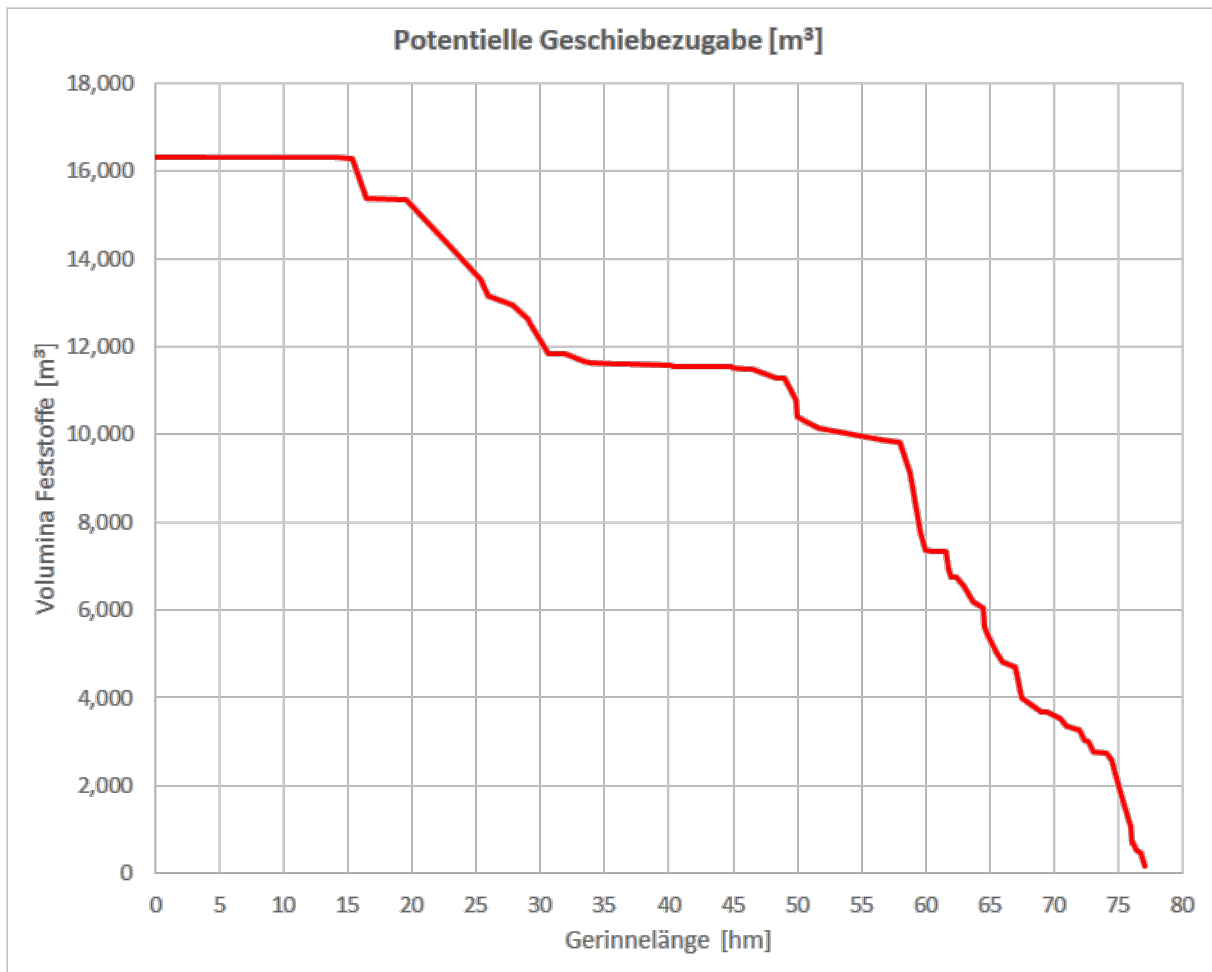
Abbildung 180 Gerinnemorphologische Beispiele nach Flussordnungszahlen nach Strahler (1964).



Geschiebefracht und abstrahiertes Gerinnesystem

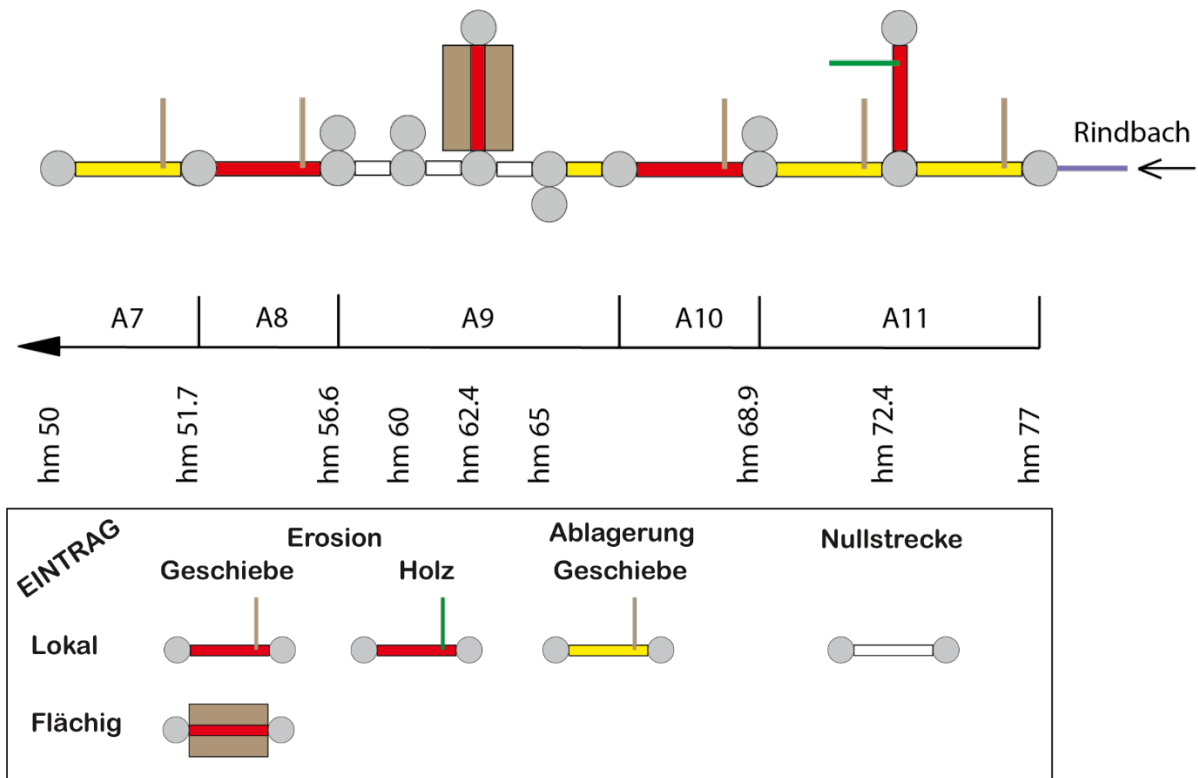
Im Juni wurde im Hauptgerinne des Rindbaches Aufnahmen zur aktuellen Geschiebesituation durchgeführt. Abbildung 181 zeigt das Geschiebefrachtendiagramm mit Stand Juni 2023.

Abbildung 181 Geschiebepotential des Rindbaches – Stand Juni 2023.



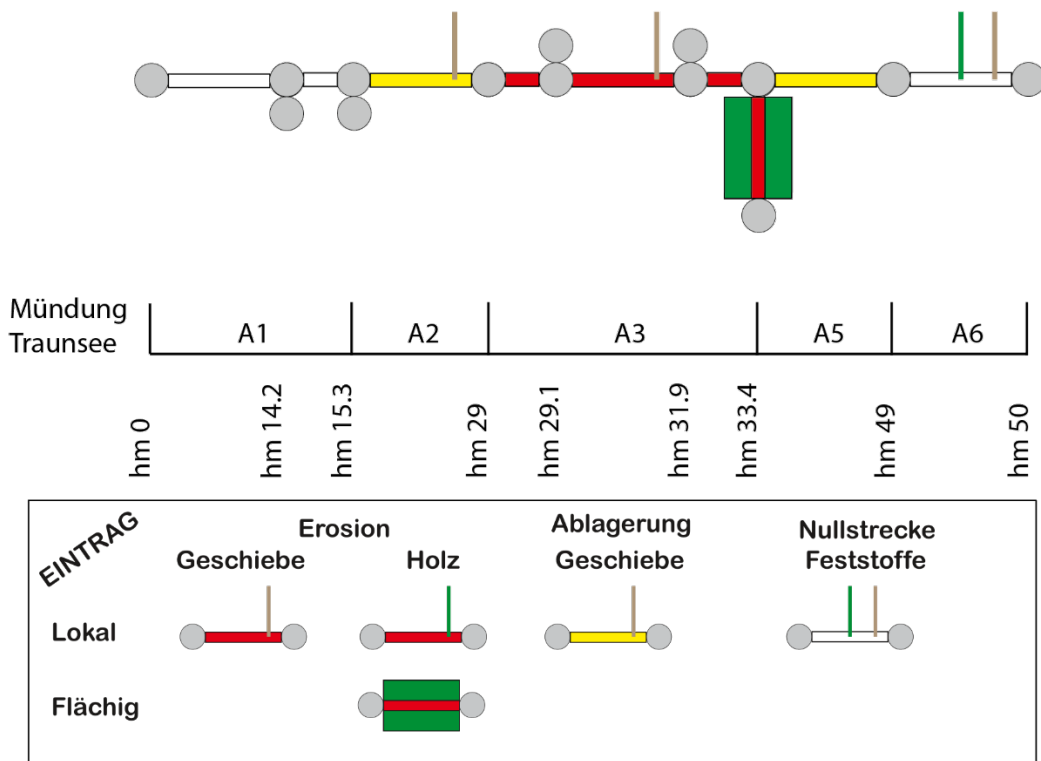
Im Zuge der Geschiebeansprachen wurde weiters ein abstrahiertes Gerinnesystem des Rindbaches gezeichnet. Abbildung 182 zeigt das abstrahierte Gerinnesystem des oberen Teiles vom Hauptgerinne des Rindbaches (hm 77 – hm 50) welches hauptsächlich als Umlagerungsstrecke mit vereinzelt Geschiebeeintrag charakterisiert werden kann.

Abbildung 182 Abstrahiertes Gerinnesystem hm 77 – hm 50 des Rindbaches.



Das abstrahierte Gerinnesystem von hm 50 bis zur Einmündung in den Traunsee ist in Abbildung 183 ersichtlich.

Abbildung 183 Abstrahiertes Gerinnesystem hm 50 - Mündung des Rindbaches in den Traunsee.



Erstellung von Korngrößenverteilungskurven basierend auf Linienzahlanalysen

Die Korngrößenverteilung ist ein zentrales Merkmal zur Charakterisierung von Sedimenten und Böden. Sie liefert wichtige Informationen über die physikalischen Eigenschaften eines Materials, wie beispielsweise die Durchlässigkeit, die Stabilität und die Erosionsanfälligkeit. In diesem Bericht werden vier Korngrößenverteilungskurven vorgestellt, die auf der Grundlage von Linienzahlanalysen erstellt wurden.

Die Linienzahlanalyse ist eine etablierte Methode, um die Korngrößenverteilung entlang einer definierten Linie zu bestimmen. Sie ermöglicht eine präzise Erfassung der Korndurchmesser und deren Häufigkeit.

Ziel dieser Arbeit war es, die Korngrößenverteilung von vier unterschiedlichen Proben zu analysieren und darzustellen (Abbildung 184, Abbildung 185). Die Ergebnisse sollen als Grundlage für weitere Untersuchungen dienen, wie beispielsweise die Bewertung der Ma-

terialeigenschaften oder die Modellierung von Transportprozessen. Die im Bericht vorgestellten Verteilungskurven bieten eine detaillierte Übersicht über die Kornzusammensetzung der untersuchten Proben und ermöglichen eine fundierte Interpretation der Ergebnisse. Die Originaldaten liegen unter zenodo.org/LZA.

Abbildung 184 Kornverteilungskurven Gerinneabschnitt nahe Wildholzrechen

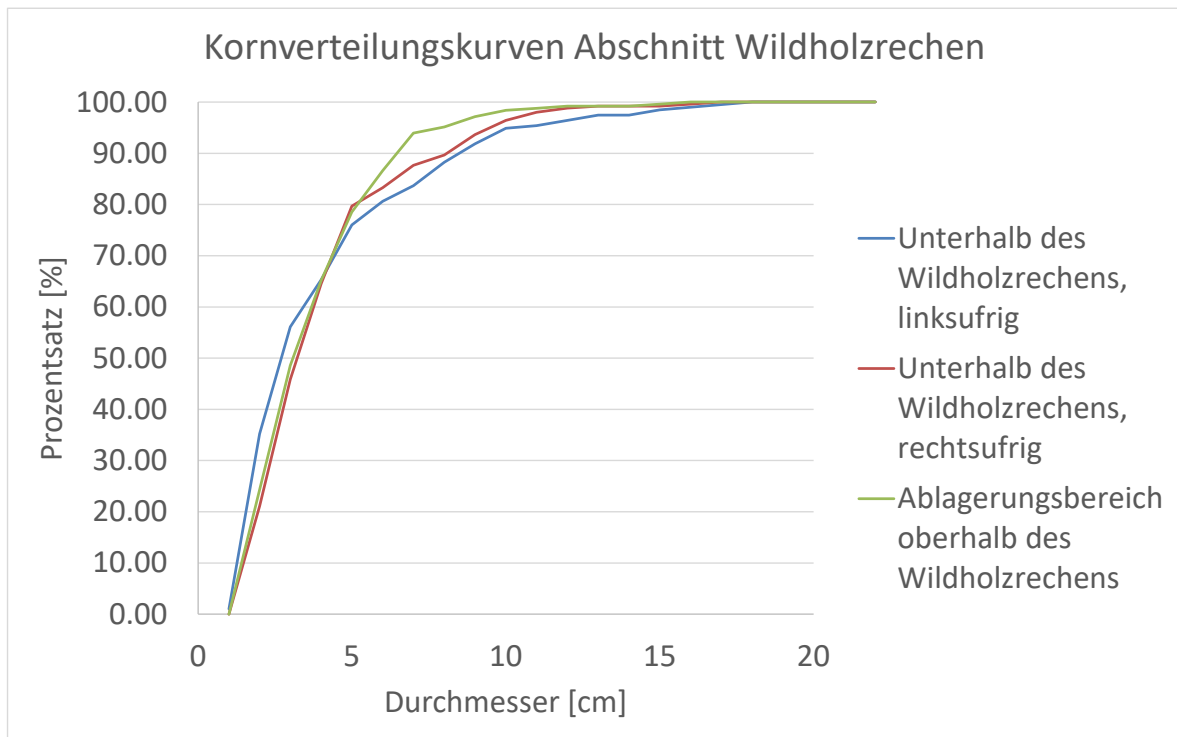
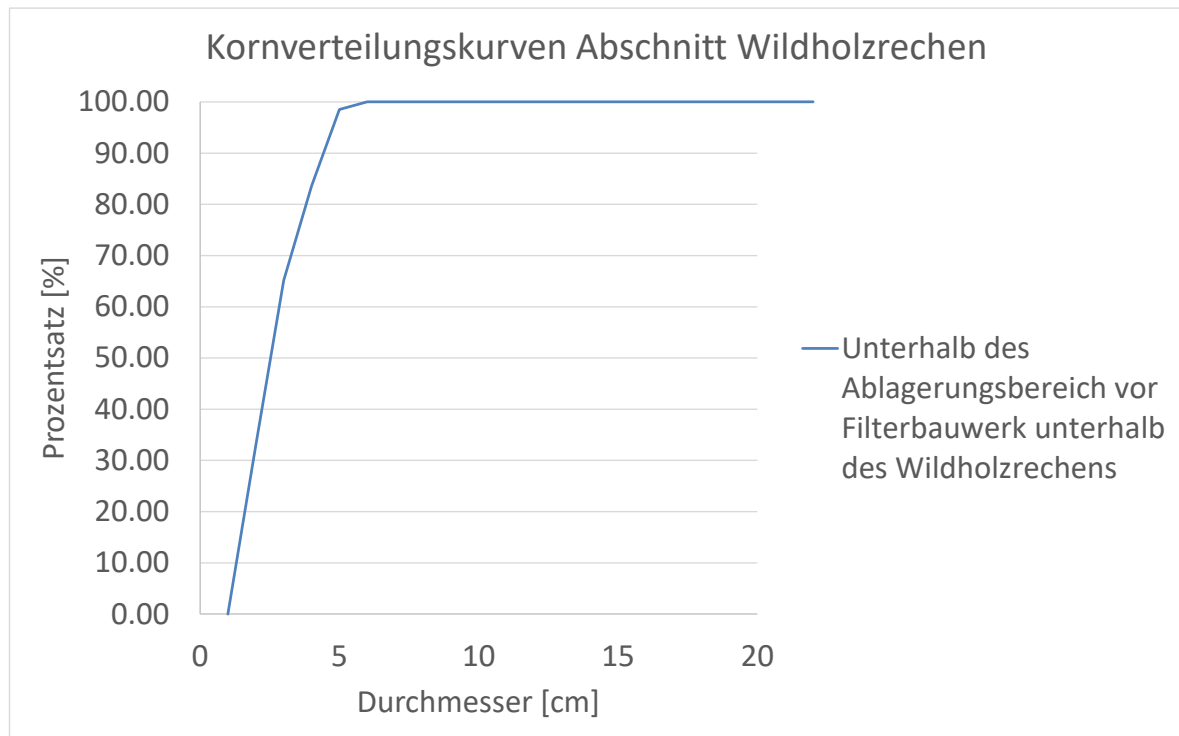


Abbildung 185 Kornverteilungskurve im Ablagerungsbereich vor Filterbauwerk unterhalb des Wildholzrechens



Abschätzung der Wildholzdisposition in Gerinnenähe im Modelleinzugsgebiet Rindbach mithilfe von Waldinventurdaten

Wildholz stellt in alpinen Regionen ein bedeutendes Problem dar, da es bei Hochwasserereignissen zu Schäden an Infrastruktur und erhöhten Risiken für die Bevölkerung führen kann. Die Frage, ob mithilfe von Waldinventurdaten eine Abschätzung des Wildholzanfalls in einem Gebiet möglich ist, bildet den Ausgangspunkt dieser Untersuchung. Ziel ist es, Kriterien zu identifizieren, die den Wildholzanfall beeinflussen, und diese in einer Karte darzustellen, um besonders anfällige Bereiche im Modelleinzugsgebiet Rindbach zu lokalisieren.

Kriterien zur Abschätzung des Wildholzanfalls

Um den Wildholzanfall zu bewerten, wurden sechs zentrale Kriterien definiert, die entweder direkt aus den Waldinventurdaten abgeleitet oder durch zusätzliche Analysen ergänzt werden können:

1. Distanz zum Gerinne

Die Entfernung eines Baumes zum Gerinne ist ein entscheidender Faktor für die Wahrscheinlichkeit, dass er als Wildholz in das Gerinne gelangt. In der Literatur werden verschiedene Distanzen vorgeschlagen, wie die durchschnittliche Baumhöhe oder die doppelte Baumhöhe, um Dominoeffekte zu berücksichtigen. In diesem Projekt wurde eine fixe Distanz von 25 Metern als ausschlaggebend angenommen.

2. Neigung des Geländes

Die Hangneigung beeinflusst die Wahrscheinlichkeit, dass ein Baum in Richtung des Gerinnes fällt. Steilere Hänge erhöhen das Risiko, da die Stabilität der Bäume auf solchen Flächen geringer ist.

3. Alter des Bestandes

Ältere Bäume haben aufgrund ihrer Größe und Masse einen größeren Einfluss auf die Wildholzproblematik. Gleichzeitig nimmt mit zunehmendem Alter die Vitalität der Bäume ab, was die Wahrscheinlichkeit des Absterbens erhöht. In dieser Arbeit wurden Laubbäume ab einem Alter von 150 Jahren und Nadelbäume ab 100 Jahren als relevant für die Wildholzentstehung definiert.

4. Transportkapazität des Gerinnes

Ein Gerinne kann nur dann Wildholz transportieren, wenn es über eine ausreichende Transportkapazität verfügt. Diese wurde mithilfe von GIS-Analysen und dem Befehl „flowaccumulation“ abgeschätzt, um das Gerinnenetz des Modelleinzugsgebiets darzustellen.

5. Schäden an Bäumen

Schäden wie Pilzbefall, Insektenbefall oder mechanische Verletzungen beschleunigen das Absterben von Bäumen und erhöhen somit das Wildholzrisiko. Da solche Schäden jedoch nicht in den verfügbaren Daten erfasst wurden, konnten sie in dieser Untersuchung nicht berücksichtigt werden.

6. Andere Wildholzquellen

Neben den oben genannten Faktoren spielen auch Lawinen, Windwürfe und Rutschungen eine Rolle bei der Entstehung von Wildholz. Diese Ereignisse müssen jedoch gesondert betrachtet und kartiert werden.

Datenquellen und Methodik

Die österreichische Waldinventur erfasst Daten auf fixen Punkten in einem Raster von 400 Metern. Da der Untersuchungsschlauch, der sich aus der Nähe zum Gerinne ergibt, nur 50 Meter misst, wurde schnell klar, dass die Waldinventurdaten allein nicht ausreichen, um eine detaillierte Analyse durchzuführen. Aus diesem Grund wurden zusätzliche Operatsdaten der österreichischen Bundesforste herangezogen, die detaillierte Informationen zu Beständen und deren Teilflächen liefern.

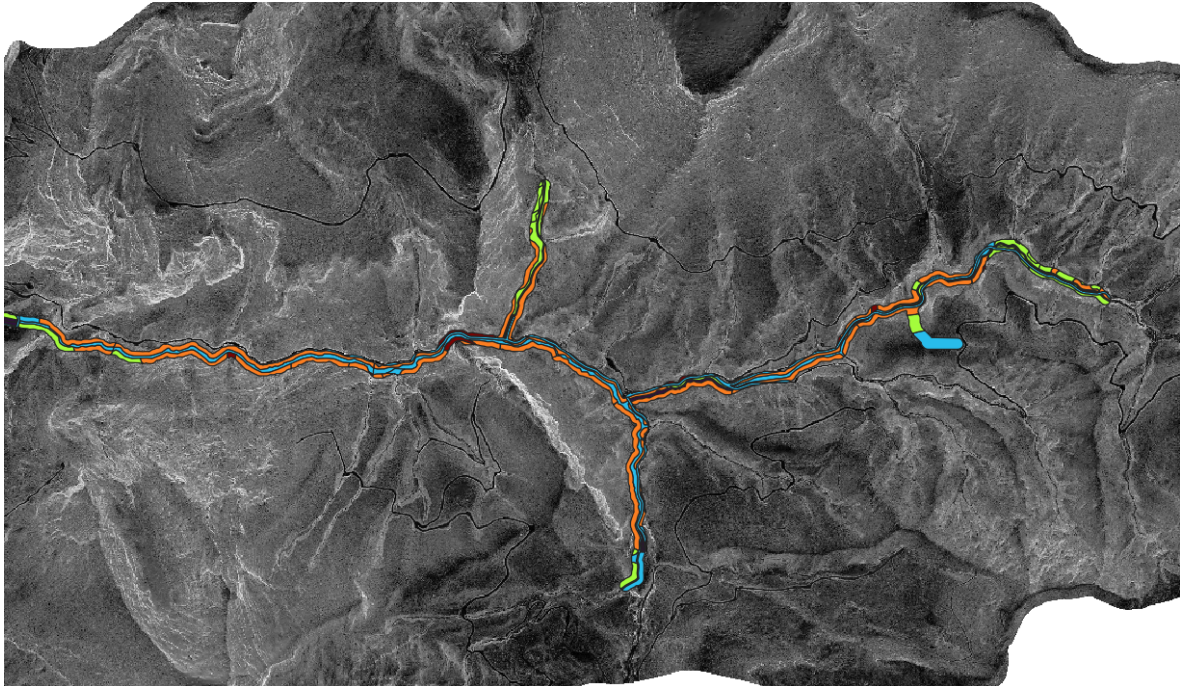
Die Analyse erfolgte durch die Kombination der oben genannten Kriterien:

- Die Distanz zum Gerinne wurde durch die Definition eines „Untersuchungsgebiets“ berücksichtigt.
- Die Transportkapazität des Gerinnes wurde bei der Erstellung des Untersuchungsgebiets einbezogen.
- Die Neigung wurde gewertet, wenn die durchschnittliche Hangneigung in der Teilfläche 45° überschritt.
- Das Alter der Bäume wurde als Treiber für die Wildholzentstehung definiert, wenn die Altersgrenzen (150 Jahre für Laubbäume, 100 Jahre für Nadelbäume) überschritten wurden. Zusätzlich musste der entsprechende Bestand mehr als 30 % der Fläche einnehmen, um gewertet zu werden.

Erste Ergebnisse und Einschränkungen

Das Ergebnis dieser Arbeit ist eine Karte (Abbildung 186), die Bereiche im Modelleinzugsgebiet Rindbach darstellt, die aufgrund der genannten Kriterien als besonders anfällig für die Entstehung von Wildholz gelten. Diese Karte bietet eine Grundlage für weitere Untersuchungen und Maßnahmen zur Risikominimierung.

Abbildung 186 Vorläufige Wildholzdispositionskarte für das MEZG Rindbach. Rötliche Farbtöne = hohe Disposition, grüne Farbtöne = keine Disposition, blaue Farbtöne = hohe Verbisstätigkeit in Gerinnenähe.



Eine Einschränkung der Analyse liegt in der fehlenden Berücksichtigung von Schäden an Bäumen, da diese in den Operatsdaten nicht erfasst werden. Ebenso wurden andere Wildholzquellen wie Lawinen und Rutschungen nicht in die Hauptanalyse integriert, sondern nur als ergänzende Faktoren betrachtet.

Zusammenfassung und Ausblick

In der ersten Projektperiode wurden grundlegende und wildbachspezifische Geodaten erhoben und generiert. Weiters konnten insgesamt zwei Exkursionen im Rahmen der VO „Mountain Hazard Processes“ am Rindbach abgehalten werden, wobei mehrere Gruppen Linienzahlanalysen für Kornerteilungskurven im Hauptgerinne durchführten.

Die Kombination von Waldinventurdaten und Operatsdaten ermöglicht eine erste Abschätzung des Wildholzanfalls im Modelleinzugsgebiet Rindbach. Die entwickelte Karte bietet wertvolle Hinweise auf potenziell gefährdete Bereiche und kann als Grundlage für weitere Forschung und Managementmaßnahmen dienen. Zukünftige Arbeiten sollten jedoch zusätzliche Datenquellen einbeziehen, um die Analyse weiter zu verfeinern und zusätzliche Faktoren wie Schäden oder extreme Wetterereignisse zu berücksichtigen.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Erhobene Geodaten im Zuge des AP 3	17
Tabelle 2 Chemische Substrattypen (SGes) für die Auswahlpolygone	47
Tabelle 3: Analysenumfang einschließlich Methoden, Geräte und Referenzen.....	50
Tabelle 4: Deskriptive Statistik für ausgewählte physikochemische Bodeneigenschaften getrennt nach Auflage und Mineralbodentiefenstufen einschließlich Probenzahl. Korngrößenanalysen, also die Bestimmung Sand [%], Schluff [%] und Ton [%], wurden nur durchgeführt, wenn der C _{org} -Gehalt unter 5 % lag.	53
Tabelle 5 Datenerhebungskonzept für die Bestandes- und Zustandserhebung des LKW- befahrbaren Forststraßennetzes im MEZG-Rindbach.....	68
Tabelle 6 Deskriptive Statistik zu den Tragfähigkeitsmessungen bei unterschiedlichem Wassergehalt des Straßenkörpers	86
Tabelle 7 Deskriptive Statistik zu den erhobenen Durchlässen im MEZG-Rindbach	89
Tabelle 8 Deskriptive Statistik zu den erhobenen Fahrbahnbreiten im MEZG-Rindbach ...	91
Tabelle 9 Übersicht zum Zustand der Fahrbahnoberfläche und Längsentwässerung.....	92
Tabelle 10 Anteilige Längen je Neigungsklasse für das verifizierte LKW-befahrbare Forststraßennetz im MEZG.....	108
Tabelle 11 Anzahl Kurven und Kehren je Radius für das LKW-befahrbare Forststraßennetz im MEZG	109
Tabelle 12 Übersicht zu den Aktivitäten im MEZG-Rindbach und zu Veranstaltungen bei denen das Projekt und dessen Inhalt präsentiert und diskutiert wurde mit Fokus auf das AP 5.2.....	111
Tabelle 13 Beschreibung der Vorfeuchteindizes für versch. Systemzustände	130
Tabelle 14 Gewichtungsfaktoren Niederschläge unterschiedlicher Dauer für die Berechnung der verschiedenen Vorfeuchte-Indizes.....	131
Tabelle 15 Ereignischarakteristika – Kennwerte Abfluss	133
Tabelle 16 Flächenanteile der Teileinzugsgebiete in Relation zum Gesamteinzugsgebiet (bis zum Pegel Nicolai-Brücke)	144
Tabelle 17 Übersicht über die topographischen Kennwerte der Teileinzugsgebiete.....	144
Tabelle 18 Übersicht über die hydrologischen Kennwerte der Teileinzugsgebiete	145
Tabelle 19 Übersicht über den Datensatz „Q sichtbar“ und die Ereignisse, welche für die manuelle Auswertung verwendet wurden (rot markiert)	147
Tabelle 20 Übersicht über die drei größten Spitzenabflüsse je Teileinzugsgebiet	160
Tabelle 21 Niederschlagscharakteristiken der fünf Ereignisse mit dem größten Spitzenabfluss am Pegel Rindbach	161

Tabelle 22 Spitzenabflusswerte der fünf Ereignisse mit dem größten Spitzenabfluss am Pegel Rindbach und den zugehörigen Spitzenabflusswerten der Teileinzugsgebiete.....	162
Tabelle 23 Verfügbare Felddaten des ÖBF für den Rindbach, einschließlich Artenzusammensetzung, Vegetationstyp und Einteilung in 8 Altersklassen für 26 untersuchte Bestände. Die Altersklassen sind wie folgt: Altersklasse 1 (0–20 Jahre), Altersklasse 2 (21–40 Jahre), Altersklasse 3 (41–60 Jahre), Altersklasse 4 (61–80 Jahre), Altersklasse 5 (81–100 Jahre), Altersklasse 6 (101–120 Jahre), Altersklasse 7 (121–140 Jahre) und Altersklasse 8 (141+ Jahre).....	184
Tabelle 24 Jeder Mikrostandorttyp (Mineralien, Streu, Bodenvegetation, Gehölzteile usw.) wird bewertet und ihm wird basierend auf seinem Anteil innerhalb einer 1,49 Meter großen Satellitenfläche eine bestimmte Anzahl von Bedeckungseinheiten zugewiesen. Für jeden Mikrostandorttyp werden Definitionen bereitgestellt, um ihn genau identifizieren und charakterisieren zu können. Die beobachtete Gesamtmenge der Bodenbedeckung wird auf maximal 10 Einheiten skaliert, was als Prozentskala (d.h.: 0 bis 100 %) interpretiert werden kann. Dieser standardisierte Ansatz gewährleistet eine konsistente und systematische Bewertung der Mikrostandortmerkmale über verschiedene Flächen hinweg und ermöglicht genaue Vergleiche und Analysen.....	187
Tabelle 25 Das Klassifizierungssystem des NFI (Schwedisches Nationales Waldinventar) für Totholzzersetzungsklassen.....	188
Tabelle 26 Anzahl der pro Baumart beobachteten Keimlinge, niedrigen und hohen Jungwuchs, zusammen mit dem Verbissaufkommen und der Höhenklasse (HC), wobei HC1, HC2 und HC3 Höhenbereichen von 0–30 cm, 31–80 cm bzw. 81–130 cm entsprechen. HC1-Messungen wurden im inneren Kreis durchgeführt, während HC2- und HC3-Messungen im größeren Kreis innerhalb jedes Satellitenplots durchgeführt wurden. Zusätzlich wurde die Anzahl junger Bäume mit einer Höhe von über 130 cm und einem Durchmesser von weniger als 8 cm erfasst und anhand ihres Brusthöhendurchmessers in Gruppen eingeteilt: 0–4 cm und 4–8 cm. Diese Bäume wurden weiter in beschädigte und unbeschädigte Kategorien unterteilt, wobei beschädigte Bäume in solche unterteilt wurden, die von Wildtieren abgefressen oder geschält wurden.....	196
Tabelle 27 Vier dominante Arten in drei Höhenklassen repräsentieren zusammen fast 94 % der Verjüngung (0–130 cm), und die restlichen acht Arten machen die restlichen 6 % aus.	197
Tabelle 28 Bodenbedeckungskategorien für die Linienstichproben (7 m)	228
Tabelle 29 Verbiss und Schälschaden Kategorien der Jungwuchs.....	231
Tabelle 30 Aggregationsparameter (Referenzwerte) der Linienstichprobe, adaptiert nach Perzl & Rössel (2018).....	234

Tabelle 31 Parameter der Bodenbedeckung durch Bodenvegetation, adaptiert nach Perzl & Rössel (2018).....	235
Tabelle 32 Klassen, Abkürzungen und Beschreibung der fünf Höhenklassen von Jungwuchs und Strauchschicht	236
Tabelle 33 Aggregationsparameter (Referenzwerte) der terrestrischen Stichprobe für die Strauchschicht, adaptiert nach Perzl & Rössel (2018)	236
Tabelle 34 Aggregationsparameter (Referenzwerte) der Baumschicht aus den Referenzstichproben, adaptiert nach Perzl & Rössel (2018)	237
Tabelle 35 Übersicht ULS-Kampagnen im MEZG-Rindbach	247
Tabelle 36 Getestete Modellparameter-Kombinationen für Lawinensimulationen in com4FlowPy mit (VarX-withFor) und ohne (VarX-noFor) Berücksichtigung der Waldwirkung	268
Tabelle 37 Ergebnisse des einseitigen Anova-Tests zum Vergleich BHD, Höhe, und HD-Wert für die Baumarten Fichte (PIAB), Mehlbeere (SOAR), Buche (FASY), und Lärche (LADE) in der CSP7.....	287
Tabelle 38 Ergebnisse der gepaarten t-Tests zwischen den Erhebungsmethoden CSP7 und WZP4 für die durchschnittliche Bestandeshöhe, die Grundfläche und die Stammzahl auf den 66 SPZ-Flächen	290
Tabelle 39 Ergebnisse des Welchs t-Tests für die Parameter Höhe, BHD, HD-Wert und Stammzahl der Baumarten Buche (FASY), Lärche (LADE) und Fichte (PIAB) zwischen BFW- und ÖBf-Stichprobepunkten im Untersuchungsgebiet TEZG 1.4.....	293
Tabelle 40 Details zu den LiDAR-Kampagnen im MEZG-Rindbach, bezogen auf die gefilterten und vor-prozessierten Punktwolken	295
Tabelle 41 Übersicht der Ergebnisse der top-down (TD) und bottom-up (BU) Prozessierung in den pilot subsets; dargestellt sind die Anzahl der mit beiden Methoden detektierten Bäume, die mittlere Stammzahl (MSZ), die mittlere Baumhöhe (MBH), der mittlere Kronendurchmesser (MKD), sowie der Kronenbedeckungsgrad (KBG) – jeweils gemittelt auf die 50×50 m pilot subsets, bzw. auf die Werte pro Hektar (für MSZ)	307
Tabelle 42 Vergleich der PRA-Layer im MEZG-Rindbach, aufsteigend sortiert nach ihrem prozentualen Anteil an der Gesamtfläche des MEZG (2.393,17 ha).....	312
Tabelle 43: Länge aller Gerinne nach ihrer Flussordnungszahl (Strahler, 1964).	328

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Einzugsgebiet des Rindbaches mit Lage der Pegel/abfluss- und meteorologischen Messstationen. Die grün hinterlegte Fläche zeigt das nahezu das gesamte Einzugsgebiet bewaldet ist.	7
Abbildung 2 Permanente Messstationen im MEZG-Rindbach. Links: Wasserstands- und Fließgeschwindigkeitsmessung an der Jocherbrücke. Rechts: Große Meteorologische Messstation im Einzugsgebiet.	9
Abbildung 3 Schutzwaldzentrum am Waldcampus Traunkirchen.	10
Abbildung 4 Lithologische Gliederung des Rindbach Einzugsgebiets	21
Abbildung 5 Typische Gesteinseinheiten des Einzugsgebietes.....	23
Abbildung 6 Gesteinseinheiten, geomorphologische Ausprägungen und Geländeaspekt des Karstplateaus der Tennalm (letztes Foto)	23
Abbildung 7 Abflusstypen	25
Abbildung 8 Abflusstyp – dominierend Zwischenabfluss, sehr geringer Rückhalt	26
Abbildung 9 Beispiele Abflusstypen im Einzugsgebiet.....	27
Abbildung 10 Korngrößenverteilung der erhobenen Sedimentproben (Probenahmestellen siehe Abbildung 7)	28
Abbildung 11 Gesamtmineralogie der Feinfraktion (< 20 µm) der 15 Sedimentproben (Probenahmestellen siehe Abbildung 7)	29
Abbildung 12 Übersicht des Gerinnenetzes und der ca. 450 Quellen	31
Abbildung 13 Schoeller-Diagramm der Haptionen (in mg/l)	33
Abbildung 14 Jährliche Wasser-Temperaturschwankungen der ausgewählten Quellen (Balken: Mai/Juli 2023, Kreuze: September 2023), verglichen mit der Jahresmitteltemperatur der Luft in der Höhe des jeweiligen Quellaustritts (lange Querbalken).....	35
Abbildung 15 Wasser-Isotopenmessungen verglichen mit der Isotopie des Niederschlags	36
Abbildung 16 Isotopenlage der Quellwasser-Messwerte	37
Abbildung 17 Vergleich der mittleren Höhe ausgewählter Quellen mit der bekannten Höhenabhängigkeit der ¹⁸ O-Werte im Niederschlag	39
Abbildung 18 Ergebnisse der drei Abflussmesskampagnen von Juni, Juli und November 2024.....	41
Abbildung 19 Beschreibung der Fließsysteme im MEZG-Rindbach	43
Abbildung 20 Übersicht über die Bodenerhebungspunkte und die Auswahlpolygone aus der Vorstratifizierung. Dabei stellt die Hunderterstelle der Zahl der Auswahlpolygone den chemischen Substrattyp (Tabelle 2) dar, die Zehnerstelle die Neigungsklasse und die Einerstelle die Exposition	46

Abbildung 21 Beispiele für ein seichtgründiges (links; P15) und ein tiefgründiges Bodenprofil (rechts; P16).	49
Abbildung 22 Boxplots der gemessenen bodenchemischen Parameter in Abhängigkeit von der Tiefenstufe; a) pH-Wert in CaCl_2 ; die farblich hinterlegten Pufferbereiche verdeutlichen bodenchemisch relevante Schwellen: $\text{pH} < 3.8$ = Aluminium-Eisen-Pufferbereich (rot), $3.8\text{--}4.2$ = Aluminiumpuffer (orange), $4.2\text{--}5.0$ = Austauscherpuffer (gelb), $5.0\text{--}6.2$ = Silikatpuffer (grün), > 6.2 = Karbonatpuffer (blau); b) Basensättigung (%); Klassengrenzen basieren auf der Einteilung der Basenversorgungsstufen: $< 8\%$ = extrem basenarm (rot), $8\text{--}35\%$ = basenarm (orange), $35\text{--}60\%$ = mäßige Basenversorgung (gelb), $60\text{--}90\%$ = basenreich (grün), $> 90\%$ = basengesättigt (blau); c) Effektive Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff} , mmolc kg^{-1}); die farbliche Hinterlegung differenziert praxisnahe Versorgungsbereiche: < 30 = sehr gering (dunkelrot), $30\text{--}60$ = gering (rot), $60\text{--}100$ = mäßig (orange), $100\text{--}200$ = mittel (gelb), $200\text{--}400$ = hoch (grün), > 400 = sehr hoch (blau); d) Organischer Kohlenstoff (g kg^{-1}) und e) C/N-Verhältnis.....	56
Abbildung 23 Boxplots der gemessenen bodenchemischen Parameter in Abhängigkeit der Tiefenstufe und des Bodenprofils (REZ = Rendzina, KLB = Kalkbraunlehm, Cha_BRE = carbonathaltige Braunerde, Typ_BRE = typische Braunerde, PGT = Typischer Pseudogley); a) pH-Wert in CaCl_2 ; die farblich hinterlegten Pufferbereiche verdeutlichen bodenchemisch relevante Schwellen: $\text{pH} < 3.8$ = Aluminium-Eisen-Pufferbereich (rot), $3.8\text{--}4.2$ = Aluminiumpuffer (orange), $4.2\text{--}5.0$ = Austauscherpuffer (gelb), $5.0\text{--}6.2$ = Silikatpuffer (grün), > 6.2 = Karbonatpuffer (blau); b) Basensättigung (%); Klassengrenzen basieren auf der Einteilung der Basenversorgungsstufen: $< 8\%$ = extrem basenarm (rot), $8\text{--}35\%$ = basenarm (orange), $35\text{--}60\%$ = mäßige Basenversorgung (gelb), $60\text{--}90\%$ = basenreich (grün), $> 90\%$ = basengesättigt (blau); c) Effektive Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff} , mmolc kg^{-1}); die farbliche Hinterlegung differenziert praxisnahe Versorgungsbereiche: < 30 = sehr gering (dunkelrot), $30\text{--}60$ = gering (rot), $60\text{--}100$ = mäßig (orange), $100\text{--}200$ = mittel (gelb), $200\text{--}400$ = hoch (grün), > 400 = sehr hoch (blau); d) Organischer Kohlenstoff (g kg^{-1}) und e) C/N-Verhältnis.	59
Abbildung 24 Vorräte an organischem Kohlenstoff (SOC), Kalium (Potassium) und Phosphor (Phosphorus) im Oberboden (0–20 cm) und Unterboden (20–80 cm) differenziert nach Bodentyp. Dargestellt sind Mittelwerte auf Profilbasis (kg/ha) mit Standardabweichung; n gibt die Anzahl der berücksichtigten Profil pro Bodentyp an.	60
Abbildung 25 Kumulierte Wasserbilanz der 31 simulierten Punkte für zwei Rotationen (1800 - 2022). Die Variablen, aus denen sich die Wasserbilanz zusammensetzt, sind Kronenverdunstung, Bodenwasserverdunstung, Schneesublimation, Kronentranspiration und Abfluss.	63

Abbildung 26 Variation der Pflanzentranspiration, der Evapotranspiration und der Wassernutzungseffizienz für verschiedene Blattflächenindexgruppen (LAI) in den 31 Parzellen von Rindbach für zwei Fruchtfolgen (1800 - 2022).	64
Abbildung 27 Ziel und Ablauf der Arbeiten im AP 5.2	67
Abbildung 28 Erfassung eines Rohrdurchlasses mit Leica GS18 GNSS-RTK-Rover in Kombination mit dem Leica CS20 Feld-Controller und Leica Captivate (RTK-Einheit)	69
Abbildung 29 TERRATEST 6000 BLE im Einsatz mit dem mittelschweren Fallgewicht (15 kg) im Abstand von 200 m und Erfassen der Fahrbahnbreite im gleichen Punkt	70
Abbildung 30 Beispiel für die Dokumentation der Gestaltung und Zustand der Längsentwässerung entlang der erhobenen Straßenabschnitte	71
Abbildung 31 Drohne beim Aufsteigen über der Forststraße mit montiertem Laserscanner	72
Abbildung 32 Montierte Action-Kameras am Heck des VW-Busses für die photogrammetrische Erfassung der Forststraße	73
Abbildung 33 Aufgelegter und fixierter Marker für die spätere Weiterverarbeitung der Bilder in der Spezialsoftware Agisoft Metashape inklusive Vermessung der Lage des Markers.	74
Abbildung 34 Beispiel für einen digitalisierten Forststraßenabschnitt (rosa eingefärbt) mit dem verfügbaren Orthofoto im Hintergrund als Grundlage für die Festlegung des Polygons	75
Abbildung 35 Beispiel für einen digitalisierten Forststraßenabschnitt (rosa eingefärbt) mit dem verfügbaren DGM im Hintergrund als Grundlage für die Festlegung des Polygons....	76
Abbildung 36 Übersicht zu den abgegrenzten Teileinzugsgebieten für die Simulation im Rahmen der Masterarbeit von Amerhauser (2025)	78
Abbildung 37 Übersicht zum abgegrenzten Teileinzugsgebiet TG1 für die Simulation im Rahmen der Masterarbeit von Amerhauser (2025) im Detail	79
Abbildung 38 Übersicht zum abgegrenzten Teileinzugsgebiet TG2_3 für die Simulation im Rahmen der Masterarbeit von Amerhauser (2025) im Detail	80
Abbildung 39 Niederschlag, Temperaturverlauf und relative Luftfeuchtigkeit vor den Messungen im „trockenen“ Zustand	82
Abbildung 40 Niederschlag, Temperaturverlauf und relative Luftfeuchtigkeit vor den Messungen im „nassen“ Zustand	83
Abbildung 41 Tragfähigkeitsmessungen im „trockenen“ Zustand des Straßenkörpers für das Forststraßennetz im Großteil des MEZG	84
Abbildung 42 Tragfähigkeitsmessungen im „nassen“ Zustand des Straßenkörpers für das Forststraßennetz im Großteil des MEZG	85

Abbildung 43 Boxplots zu den Tragfähigkeitsmessungen im „trockenen“ Zustand des Straßenkörpers für einen Teil des Forststraßennetzes im Nordwesten des MEZG	86
Abbildung 44 Boxplots zu den Tragfähigkeitsmessungen im „trockenen“ Zustand des Straßenkörpers für das Forststraßennetze im Großteil des MEZG-Rindbach	87
Abbildung 45 Boxplots zu den Tragfähigkeitsmessungen im „nassen“ Zustand des Straßenkörpers für das Forststraßennetze im Großteil des MEZG	88
Abbildung 46 Erfasste und verortete Durchlässe inklusive Darstellung deren Funktionstauglichkeit	90
Abbildung 47 Erfasste und verortete Brücken im Nordteil des Einzugsgebietes	91
Abbildung 48 Erfasste und verortete Ansprache des Fahrbahnzustandes	93
Abbildung 49 Erfasste und verortete Ansprache der Längsentwässerung	94
Abbildung 50 Erfasste und verortete Ansprache des Wasserabflusses auf der Fahrbahn..	95
Abbildung 51 Erfasste und verortete Ansprache des Bewuchses auf der Fahrbahn	96
Abbildung 52 Forststraßenabschnitt mittels Drohnenbefliegung und Laserscanner	98
Abbildung 53 Beispiel zu einem digitalisierten Forststraßenabschnitt mittels Drohnenbefliegung mit Laserscanner in der Übersicht	99
Abbildung 54 Beispiel zu dem digitalisierten Forststraßenabschnitt mittels Drohnenbefliegung mit Laserscanner in Detailansicht	100
Abbildung 55 Beispiel zu einem digitalisierten Querschnitt eines Forststraßenabschnittes mittels Drohnenbefliegung mit Laserscanner	101
Abbildung 56 Beispiel zu einem digitalisierten Querschnitt eines Forststraßenabschnittes mittels Drohnenbefliegung mit Laserscanner	102
Abbildung 57 Übersicht zu den erhobenen Straßenabschnitten mittels Photogrammetrie im MEZG	103
Abbildung 58 Originalbild von den in Summe 25.300 Bildern umfassende photogrammetrische Aufnahme mit klar erkennbarem Zustand der Forststraße inklusive Oberflächenabfluss und Längsentwässerung	104
Abbildung 59 Lage des Beispielabschnittes mit den photogrammetrischen Aufnahmen im MEZG	105
Abbildung 60 Ausschnitt zu einem digitalisierten Abschnitt mittels photogrammetrischer Aufnahmen und ausgearbeiteter 3D-Punktwolke mittels Structure from Motion-Technik	106
Abbildung 61 Erstelltes digitale Geländemodell vom Beispielabschnitt mit einer Auflösung von 10 cm/Pixel	107
Abbildung 62 Beispiel für ein generiertes und analysiertes Querprofil auf Basis des DGM mit 50 cm/Pixel Auflösung und den entsprechenden Geländeneigungsklassen zur Identifizierung der einzelnen Abschnitte	109

Abbildung 63 Analyisierte Kurven- und Kehrenradien im gesamten MEZG	110
Abbildung 64 Weiterführende Arbeiten	113
Abbildung 65 Beispiel zur automatisierten Klassifikation mittels OTB-Werkzeuge mit Orthofoto im Hintergrund	114
Abbildung 66 Beispiel zur automatisierten Klassifikation mittels OTB-Werkzeuge mit DGM im Hintergrund	115
Abbildung 67 Berechnungsflächen im Rindbach – an den mit roten Pfeilen markierten Standorten waren Beregnungen mangels ausreichendem Wasserangebot nicht möglich, mit blauen Pfeilen markierte Standorte wurden beregnet.	117
Abbildung 68 Beispiel Beregnung / Starkregensimulation.	118
Abbildung 69 Lage der Abflusshöhensensoren und der zugehörigen Teileinzugsgebiete	120
Abbildung 70 Fließhöhen-Messpunkte im MEZG-Rindbach (Sensoren R1 bis R6)	121
Abbildung 71 Für die Abflussdaten-Auswertung erstellte Python-Skripte	123
Abbildung 72 Rohdaten der Abflusshöhenmessung am Sensor R2 für den Juni 2024, mit Messfehlern	124
Abbildung 73 Ergebnisse des Vorchecks und Plausibilitätscheck des Sensors R2 für Juni 2024	125
Abbildung 74 Theoretische Pegelschlüssel nach verschiedenen Formelansätzen für den Sensor R4	127
Abbildung 75 Durchflüsse der Sensoren 1 bis 6 für den Monat Juni berechnet mit den Ansätzen von Bezzola (2002), Rickenmann (1996), Smart & Jäggi (1983) und dem Variablen Potenzgesetz (Rickenmann und Recking, 2011)	128
Abbildung 76 Beispielsplot – meteorologische Daten für September 2024	129
Abbildung 77 Entwicklung der Bodenfeuchte Juni bis Oktober 2024	130
Abbildung 78 Niederschlagsverlauf, Durchfluss-Pegel Rindbach, Bodenfeuchte und Vorfeuchteindizes für den Monat Oktober 2024	132
Abbildung 79 Beispiel für die Auswertung der Ganglinien mit zwei Abflussspitzen (Ereignis 4, Sensor 2)	135
Abbildung 80 Lage der Wetterstationen im MEZG-Rindbach	137
Abbildung 81 Ergebnisse der Starkregensimulationen (Abbildungen auf der linken Seite) und Änderung der Bodenfeuchte durch die Beregnungen (Bilder auf der rechten Seite) für die Beregnungsflächen 1–3. Die Lage der Beregnungsflächen im Projektgebiet ist aus Abbildung 6 ersichtlich. $PSI_{int} = \Psi_{const}$, $PSI_{tot} = \Psi_{tot}$, PSI_{int_ZA} = Abflussbeiwert des ZA bei Abflusskonstanz, PSI_{tot_ZA} = Abflussbeiwert des ZA gesamt. iT = Niederschlag. P2 5 = Bodenfeuchtesonde am Profil 2 in der Testfläche in 5 cm Tiefe, u.s.w.	139

Abbildung 82 Profilgraphen – volumsgerechte Verteilung von Bodenskelett > 2 mm, Durchmesser, Feinboden (Sand, Schluff Ton), organischer Substanz und der Porenvolumina für die Beregnungsflächen BF1 (oben), BF2 (Bildmitte) und BF6 (unten)	140
Abbildung 83 Karte der Landnutzung – aus Wieshammer (2025 – in Vorbereitung).....	142
Abbildung 84 Abflussbeiwertkarte MEZG-Rindbach – aus Wieshammer (2025 – in Vorbereitung)	143
Abbildung 85 Niederschlagssumme [mm] und effektive Regenzeit in Minuten der in Tabelle 19 angeführten Ereignisse, logarithmische Darstellung.....	146
Abbildung 86 Ereignisplot Teil 1 des Ereignisses Nummer 40	151
Abbildung 87 Ereignisplot Teil 2 des Ereignisses Nummer 40	154
Abbildung 88 Histogramm der Niederschlagssumme und der effektiven Intensität der identifizierten Ereignisse	155
Abbildung 89 Histogramm der effektiven Ereignisdauer der identifizierten Ereignisse ...	156
Abbildung 90 Histogramme der Ereignisabflussbeiwerte der Teileinzugsgebiete 1-6 (Sensoren 1-6)	157
Abbildung 91 Histogramm des Spitzenabflusses der Teileinzugsgebiete 1-6 (Sensoren 1-6)	159
Abbildung 92 Effektive mittlere Intensität und Ereignisdauer (log-log Darstellung) mit farblich klassifizierten Spitzenabflusswerten des Pegel Rindbachs. Die größten 15 Werte sind gekennzeichnet.....	161
Abbildung 93 Spitzenabflussspende [m^3/s pro km^2] und Niederschlagssumme [mm] für alle Teileinzugsgebiete (1–6) und den Pegel Rindbach (P)	164
Abbildung 94 Auswertung der Zeitdifferenz zwischen Niederschlagsbeginn und Anspringen des Pegels bzw. Niederschlagsmaximum und Abflussspitze für die sechs beobachteten Teileinzugsgebiete, Zeitdifferenz als Mittelwerte für Vorniederschlagsklassen 0 bis 20 mm, 20 bis 50 mm und über 50 mm	165
Abbildung 95 Typische Ganglinienform für die Teileinzugsgebiete 2 und 3.....	167
Abbildung 96 Taxationsformular für die Erhebung von Ökosystemleistungsindikatoren.	174
Abbildung 97 Indikatoren und Merkmalsausprägung für die Ökosystemleistung „Hangrutschungssicherung“	176
Abbildung 98: Jagdfreie Zonen im Rindbach. Die grünen und roten Zonen gelten von August bis Oktober und die orangefarbene Zone von August bis April.....	180
Abbildung 99: Die türkisfarbenen Polygone stellen die zugänglichen Standorte dar, die auf einem regelmäßigen Raster basieren, das das gesamte Gebiet (300 x 300 Meter) abdeckt, während die roten Abschnitte die 26 untersuchten Standorte im Wald anzeigen	182
Abbildung 100 Der in rot eingefärbte Perimeter oben ist ein Beispiel für einen vermessenen Bestand (Polygon) mit vier festen kreisförmigen Parzellen (1 bis 4). Jede	

feste kreisförmige Parzelle enthielt vier Satellitenparzellen, die 4 Meter vom Zentrum entfernt sowohl in Nord-Süd- als auch in Ost-West-Richtung positioniert waren. In der Mitte jeder Satellitenparzelle wurde eine Kamera für hemisphärische Aufnahmen positioniert	183
Abbildung 101 Bewertung der Zusammensetzung von Mikrostandorten durch Erfassung des prozentualen Anteils von Mineralien, Streu, Vegetation und Holz innerhalb einer Fläche von 1,49 Metern, wobei ein Pfahl als Mittelpunkt für eine genaue Kategorisierung dient.....	189
Abbildung 102 Beispiel für eine hemisphärische Fotografie, bei der der Zenit in der Bildmitte liegt und nach Norden ausgerichtet ist (a), unterteilt in 18 Azimut- und 8 Zenitbereiche in der Himmelskarte und mit angepasstem Schwellenwert (b). Diese Unterteilungen helfen dem Programm, die Baumkronenstrukturen und die Sonnenstrahlungstransmission genauer zu berechnen. Die Ost- und Westausrichtung ist aufgrund der Aufwärtsansicht anstelle der Abwärtsansicht gegenüber der üblichen Kartenkonvention umgekehrt	191
Abbildung 103 Schema einer Parzelle in denen alle Keimlinge (0–30 cm) im inneren Kreis (grüner Zylinder) und alle kurzen und hohen Jungbäume (30–130 cm) im größeren Kreis (grauer Zylinder) erfasst, nach Arten identifiziert, in Höhenklassen eingeteilt und auf alte oder neue Verbisschäden untersucht. Junge Bäume mit einer Höhe von mehr als 130 cm wurden ebenfalls erfasst wobei ihr Brusthöhendurchmesser (DBH) in zwei Kategorien eingeteilt wurde: 0–4 cm und 4–8 cm. Diese jungen Bäume wurden einer weiteren Bewertung hinsichtlich der Artenidentifizierung unterzogen und auf neue oder alte Verbiss- und Entrindungsschäden untersucht	193
Abbildung 104 Verteilung der Baumarten nach Regenerationshöhe: Das obere Feld zeigt die Verteilung der Baumarten, die höher als 130 cm sind, während das untere Feld die Arten darstellt, die niedriger als 130 cm sind. Die am häufigsten vorkommenden Arten in der Regenerationsphase (<130 cm) waren Buche (<i>F. sylvatica</i>), Esche (<i>F. excelsior</i>), Bergahorn (<i>A. pseudoplatanus</i>) und Fichte (<i>P. abies</i>), die zusammen diese Höhenklasse dominierten. Unter den jungen Bäumen mit einer Höhe von mehr als 130 cm waren Buche und Fichte die häufigsten Arten. Die Baumarten sind alphabetisch geordnet, und Arten, die weniger als 0,5 % der Gesamtverteilung ausmachen, sind in den Feldern nicht aufgeführt.....	198
Abbildung 105 Von insgesamt 2,649 registrierten Individuen fällt fast die Hälfte in die Höhenklasse von 0 bis 30 cm, wobei es sich um Keimlinge handelt. Etwa 25 % gehören zur zweiten Höhenklasse von 31 bis 80 cm, hauptsächlich niedrige Jungbäume. Knapp 10 % werden als 81–130 cm hohe Jungbäume eingestuft. Die übrigen Individuen sind größer als 130 cm, wobei etwa 15 % einen Brusthöhendurchmesser (BHD) zwischen 0 und 4 cm	

aufweisen, während die restlichen knapp 1 % einen BHD zwischen 4 und 8 cm aufweisen	199
Abbildung 106 Anteil der Höhenklassen (HC1: 0–30 cm, HC2: 31–80 cm, HC3: 81–130 cm) an der Verjüngung (<130 cm Höhe) für Baumarten	200
Abbildung 107 Verteilung der Verjüngungsdichte (< 130 cm Höhe) über die Höhenklassen (HC1: 0–30 cm, HC2: 31–80 cm, HC3: 81–130 cm) für die vier dominanten Arten.....	201
Abbildung 108 Lineare Regressionsmodelle zur Veranschaulichung der Korrelation zwischen der Regenerationsdichte (<130 cm Höhe) und den Variablen der hemisphärischen Fotografie: Indirekter Standortfaktor (ISF), Direkter Standortfaktor (DSF), Globaler Standortfaktor (GSF) und Blattflächenindex (LAI).....	204
Abbildung 109 Bewertung des Zusammenhangs zwischen Lichtverfügbarkeit und Höhenwachstum in den letzten zwei Jahren bei vier vorherrschenden Arten. Pro Art wurden zwei gesunde, nicht abgefressene und kräftige Individuen jeder Höhenklasse ausgewählt, um das Höhenwachstum des Haupttriebs zu messen.....	206
Abbildung 110 Regenerationsdichte über vier dominante Arten und verschiedene Mikrostandortqualitätsbereiche und Höhenklassen hinweg: HC1 (0–30 cm), HC2 (31–80 cm) und HC3 (81–130 cm)	207
Abbildung 111 Lichtverfügbarkeit und Mikrolagebedingungen für die Regenerationsetablierung. Schlechter bewertete Parzellen weisen eine höhere Lichtverfügbarkeit auf, was zu höheren ISF-, DSF- und GSF-Werten führt. Dies entspricht einem geringeren LAI für ausgewachsene Baumkronen, wodurch mehr Licht den Unterwuchs erreichen kann	209
Abbildung 112 Zusammenhang zwischen Gras- und Kräuterhöhe (a) und Bedeckungsgrad (0 bis 10) (b) und Bewertung der Mikrostandortmerkmale. Mit zunehmendem Anteil und zunehmender Höhe von Gras und Kräutern tendieren die Bewertungen der Mikrostandortmerkmale in Richtung „schlecht“ und „sehr schlecht“	210
Abbildung 113 Verbissanteile für vier dominante Arten in der Verjüngung (<130 cm Höhe). Die verschiedenen Höhenklassen innerhalb der Verbissabschnitte stellen den Anteil des Verbisses für jede Höhenklasse dar. HC1 bezieht sich auf Keimlinge (0–30 cm Höhe), HC2 steht für kurze Jungbäume (31–80 cm Höhe) und HC3 bezeichnet hohe Jungbäume (81–130 cm Höhe).	211
Abbildung 114 Beziehung zwischen Verbissanteilen und Verjüngungsdichte (<130 cm Höhe) für vier dominante Arten, basierend auf festen kreisförmigen Parzellen. Für jede Art werden feste kreisförmige Parzellen ohne Verjüngung aus der Analyse ausgeschlossen	212
Abbildung 115 Zusammenhang zwischen Verbissintensität und Verjüngungsdichte von Laubbaumarten (Höhe < 130 cm) für vier dominante Arten, basierend auf festen kreisförmigen Parzellen. Wenn es sich bei einer Art um eine Laubbaumart handelt, wird	

sie aus den Berechnungen der Laubbaum-Verjüngungsdichte ausgeschlossen (z. B. wird für Buche die Verjüngungsdichte der Laubbaumarten als Gesamtdichte minus der Dichte von Buche selbst berechnet).....	215
Abbildung 116 Positiver Einfluss von Samenbäumen auf die Verjüngungsdichte. Die Daten wurden an Gitterpunkten innerhalb eines 30-Meter-Radius erhoben, wobei alle Arten von Samenbäumen identifiziert und ihr Einfluss auf die Verjüngung bewertet wurde	217
Abbildung 117 Vorauswahl von sechs potenziellen Einzugsgebieten für die terrestrische Stichprobenaufnahme.....	221
Abbildung 118 Luftbildaufnahme des gesamten MEZG-Rindbach mit dem für die forstlichen Geländeaufnahmen erweiterten Teileinzugsgebiet 1.4	221
Abbildung 119 Ausgewähltes Teileinzugsgebiet (gelb) am Nord-Nordost Abhang des Eibenberges. Bildquelle: Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen.....	222
Abbildung 120 Gegenhangaufnahme auf das ausgewählte Teileinzugsgebiet. Bildquelle: M. Plörer vom 28.11.2022	223
Abbildung 121 ÖBf Stichprobeninventurpunkte im 400 x 400 m Raster (rote Punkte) und für den Projektzweck verdichtetes Stichproben-Raster mit 100 x 100 m (weiße Punkte)	224
Abbildung 122 Auf begehbare Bereiche reduzierte Flächen (türkis) mit den darin aus dem Raster extrahierten Stichprobenpunkten (rot)	225
Abbildung 123 Vermessung des SPZ und der Versicherungspunkte (VPI & VP II), markiert mit grünem Marker	226
Abbildung 124 Design der terrestrischen Stichprobenaufnahme im Teileinzugsgebiet 1.4 des MEZG-Rindbach	227
Abbildung 125 Linienstichprobe (grüne Schnur) zur Erfassung am Stichprobepunkt Nr. 32	229
Abbildung 126 Totholz Erfassung in MEZG-Rindbach (TEZG 1.4)	230
Abbildung 127 Zustandsklassifikation der Bäume, modifiziert nach Maser et al. (1979) und Backhouse & Lousier (1991).....	233
Abbildung 128 Übersicht der 120 ÖBf-Stichprobepunkte im Untersuchungsgebiet MEZG-Rindbach. Rot markierte Flächen kennzeichnen Schutzwälder, hellgrün markierte Flächen stehen für Wirtschaftswälder. Die gelben Punkte zeigen die Lage der einzelnen Stichprobepunkte	239
Abbildung 129 Die sieben ÖBf-Stichprobepunkte (türkis dargestellt), die für den Vergleich mit den 66 BFW-Stichprobepunkten (braun dargestellt) verwendet wurden	240
Abbildung 130 Übersicht der ULS-Befliegungsbereiche im AP7.1-Untersuchungsgebiet (A – D); der erhobenen SPZ, welche in den beflogenen Gebieten liegen (rote Kreuze); (geplante) ULS Start- und Landepunkte (orange Sechsecke), (Hintergrund s/w-Darstellung des aktuellen Orthophotos; Quelle: WLV, Sektion OÖ)	245

Abbildung 131 Eindrücke von den ULS-Befliegungen im MEZG-Rindbach – Drohnenstart zur Befliegung von Gebiet A am 28.3.2024 (oben links); Drohnenlandung am 15.05.2024 nach Befliegung von Gebiet C (oben rechts); Startvorbereitungen am 28.3.2024 (unten links); Blick vom Startpunkt der abgebrochenen Befliegung des Gebiets D am 13.11.2024 (unten rechts).....	249
Abbildung 132 Flowchart des Arbeitsschrittes ‚Datenaufbereitung‘ für a) die Aufbereitung der Rohdaten aus den binären Riegl-Messdaten, Bildern der UAS-Tageslichtkamera und den IMU- und GNSS-Rohdaten zur Bereitstellung der LAZ-files für die weitere Bearbeitung (durchgeführt von der Firma Laserdata) (links); b) die Vorprozessierung der LAZ-files am BFW durch räumliche Indizierung, Katalogisierung und Segmentierung in 50x50 m Bearbeitungseinheiten (rechts).....	250
Abbildung 133 Übersicht der pilot subsets im MEZG Rindbach mit der 50x50 m großen Begrenzung der subsets (rotes Polygon) und der Nummer des SPZ - dargestellt sind jeweils die Auszüge von den UAS SfM-MVS Orthophotos, welche zeitgleich mit den ULS-Daten aufgenommen wurden.....	252
Abbildung 134 Eindrücke vor-Ort im Nahbereich des SPZ während der forstlichen Aufnahmen im Sommer 2024 – Nummerierung in der gleichen Reihenfolge wie Abbildung 133.....	253
Abbildung 135 Flowchart des Arbeitsschrittes ‚Datenprozessierung‘ für a) die Detektion und (manuelle) Filterung großer Gruppen von Ausreißern (links); b) die automatisierte Detektion und Filterung von Rauschen und Boden-/Nicht-Boden-Klassifikation (rechts)	254
Abbildung 136 Beispiele für ULS-Punktwolken – RGB-kolorierte Punktwolke eines 50x50 m Ausschnittes eines Mischwaldbestandes im MEZG-Rindbach, aufgenommen am 23.08.2024 (links); nach Höhe über Grund eingefärbte Punktwolke (rot = hoch / blau = niedrig), die massive Scanartefakte und Ausreißer oberhalb und unterhalb der Baumpunkte aufweist (rechts)	255
Abbildung 137 Überblick des MEZG-Rindbach mit den 14 gemäß WLV verordneten Lawineneinzugsgebieten (blaue Polygone) sowie entsprechender Detail-Ansicht.....	260
Abbildung 138 Auszug aus dem Waldatlas (waldatlas.at, Thema „Historische Schadereignisse“) mit dem einzigen archivierten Lawinenereignis (weißer Pfeil/Punkt) im Häuseleckgraben (Bildquelle: waldatlas.at)	261
Abbildung 139 Vergleich von Flächen mit kritischer Hangneigung und als unzureichend eingestufte Waldbedeckung (PRAs) sowie Flächen ohne Wald, aber mit zu flacher Hangneigung (keine PRAs)	263
Abbildung 140 Lawinenanbruchpotenzial im MEZG-Rindbach basierend auf dem Projekt „GRAVIPROFOR“ (Perzl & Huber, 2014) – Anbruch-Klassen 1 = gelb, 2 = orange, 3 = rot.	264

Abbildung 141 Schema zur Ermittlung der zwei Layer potenzieller Anbruchgebiete gemäß Variante C. Dabei gelten als Kriterien eine minimale zusammenhängende Fläche mit Hangneigung zwischen 28° und 55° von mindestens 400 m ² bzw. 900 m ² sowie eine Bestandeshöhe von unter 2 m	265
Abbildung 142 Rekonstruierte Prozessfläche im Auslaufbereich der Häuseleckgrabenlawine auf Grundlage der im Luftbild von 2009 erkennbaren Waldschäden	269
Abbildung 143 (a) Erfassung der Sträucher und Jungpflanzen innerhalb des QSP, (b) Buchenwald innerhalb TEZG 1.4, (c) Nachweis von Schneeschub, (d) Schutzwirkung gegen Steinschlag.....	270
Abbildung 144 3D-Darstellung der 66 vollständig erhobenen Stichprobepunkte im MEZG-Rindbach.....	271
Abbildung 145 Durchschnittliche Bodenbedeckungswerte nach Bodenvegetations- und Nichtbodenvegetations-komponenten für die Stichprobepunkte, dargestellt mit Standardfehlerbalken.....	272
Abbildung 146 Beispielhafte Laubstreuauflage als Teil der Bodenbedeckung im Untersuchungsgebiet TEZG 1.4	273
Abbildung 147 Der durchschnittliche Vorrat an liegendem Totholz in den drei Größenklassen WDP (10 cm ≤ D ≤ 20 cm), WDT1 (20 cm ≤ D ≤ 40 cm) und WDT2 (D > 40 cm). Die Zahlen über den Standardfehlerbalken geben die Durchschnittswerte an	274
Abbildung 148 Prozentualer Anteil des Jungwuchses pro Höhenklasse (JHKL1, JHKL1+2, JHKL1+2+3, JHKL1+2+3+4+5) und gesamter Jungwuchs (a) sowie Prozentanteil von Aufforstung und Lichtmangel im TEZG 1.4 (b). Die Zahlen über den Balken geben die Durchschnittswerte an	274
Abbildung 149 Stammzahl (N/ha) pro Baumart für die fünf Verjüngungsklassen (KL1–KL5). Aufgrund geringer Fallzahlen wurden die Klassen 4 und 5 zusammengefasst.....	276
Abbildung 150 Prozentuale Baumartenanteile pro Wuchsklasse (a) und mittlere Stammzahl pro Baumart und Wuchsklasse (b). STN = Stangenholz (10 cm ≤ D ≤ 20 cm), BH1 = Baumholz 1 (20 cm ≤ D ≤ 35 cm), BH2 = Baumholz 2 (35 cm ≤ D ≤ 50 cm), BH3 = Baumholz 3 (D > 50 cm).....	276
Abbildung 151 Pflanzendichte (Stammzahl/ha) der Jungwuchsklassen (JHKL1–5) nach der Grundfläche der Baumschicht in Klassen von 10 m ² /ha. N = Anzahl der Stichprobepunkte pro Grundflächenklasse.....	278
Abbildung 152 Anteile der Verbissgrade pro Baumart und Verbissklassen mit Standardfehlerbalken. ACPS = <i>Acer pseudoplataneus</i> (Bergahorn), FASY = <i>Fagus sylvatica</i> (Buche), PIAB = <i>Picea abies</i> (Fichte)	279

Abbildung 153 (a) Prozentualer Anteil von Laub- und Nadelbäumen pro Stichpunkt (Punkt-ID), berechnet nach Pflanzendichte, und (b) durchschnittliche Höhe sowie Lorey'sche Mittelhöhe für alle 66 Stichprobepunkte. Die rote gestrichelte Linie zeigt die mittlere Höhe der Strauchschicht an	280
Abbildung 154 (a) Durchschnittliche Grundfläche (m^2/ha), (b) Stammzahl (Stück/ha), (c) Durchschnittliche Höhe (m) pro Baumart in der Strauchschicht. Anmerkung: BACSS = Grundfläche Nadelbäume der Strauchschicht, BADSS = Grundfläche Laubbäume der Strauchschicht, BASS = Gesamte Grundfläche der Strauchschicht, NCSS = Stammzahl Nadelbäume der Strauchschicht, NDSS = Stammzahl Laubbäume der Strauchschicht, NSS = Gesamte Stammzahl der Strauchschicht. ABAL = <i>Abies alba</i> , ACPS = <i>Acer pseudoplataneus</i> , COAV = <i>Corylus avellana</i> , FASY = <i>Fagus sylvatica</i> , FREX = <i>Fraxinus excelsior</i> , LADE = <i>Larix deciduous</i> , PIAB = <i>Picea abies</i> , SANI = <i>Sambucus nigra</i> , SOAR = <i>Sorbus aria</i> , SOAU = <i>Sorbus aucuparia</i> , ULGL = <i>Ulmus glabra</i>	281
Abbildung 155 (a) Durchschnittliche Grundfläche, (b) Stammzahl, (c) Grundfläche nach Arten im TEZG 1.4. BACBS = Grundfläche der Nadelbäume in der Baumschicht, BADBS = Grundfläche der Laubbäume in der Baumschicht, BABS = Gesamte Grundfläche der Baumschicht. NCBS = Stammzahl der Nadelbäume in der Baumschicht, NDBS = Stammzahl der Laubbäume in der Baumschicht, NBS = Gesamtstammzahl der Baumschicht. BAH = <i>Acer pseudoplataneus</i> , BU = <i>Fagus sylvatica</i> , FI = <i>Picea abies</i> , LAE = <i>Larix decidua</i> , TA = <i>Abies alba</i>	283
Abbildung 156 (a) Durchschnittliche BHD (cm), (b) Durchschnittliche Höhe (m), und (c) HD-Wert pro Baumarten (PIAB, FASY, ACPS, ABAL, LADE, FREX) für Bäume aus der WZP4 in der Baumschicht. PIAB = <i>Picea abies</i> , FASY = <i>Fagus sylvatica</i> , ACPS = <i>Acer pseudoplataneus</i> , ABAL = <i>Abies alba</i> , LADE = <i>Larix decidua</i> , FREX = <i>Fraxinus excelsior</i>	285
Abbildung 157 BHD-Verteilung in 10-cm-Klassen auf der x-Achse und Beobachtungsdichte (Stammzahl) auf der y-Achse. Anmerkung: ABAL = <i>Abies alba</i> , ACPS = <i>Acer pseudoplataneus</i> , FASY = <i>Fagus sylvatica</i> , FREX = <i>Fraxinus excelsior</i> , LADE = <i>Larix decidua</i> , PIAB = <i>Picea abies</i>	285
Abbildung 158 Vergleich der Parameter (a) Brusthöhendurchmesser (BHD), (b) Baumhöhe und (c) HD-Wert zwischen den Baumarten Fichte (PIAB), Mehlsbeere (SOAR), Buche (FASY) und Lärche (LADE) aus der CSP7-Stichprobe. Die Zahlen in den Boxen geben den Mittelwert des jeweiligen Parameters an. Die hellen Punkte repräsentieren die Einzelbeobachtungen pro Baumart	288
Abbildung 159 Vergleich der Parameter der Baumschicht zwischen CSP7 und WZP4 Stichproben: (a) Grundfläche (m^2/ha), (b) Stammzahl (Stück/ha), (c) Bestandeshöhe (m), (d) Kronenzustand	289

Abbildung 160 Vergleich zwischen Bestandesschichten; Verjüngung (J1,J2), Strauchschicht (SS), Baumschicht (BS), Waldbestand (WB) für Parameter (a) Grundfläche, (b) Stammzahl, (c) QMD, (d) Bestandeshöhe. Die roten Punkte sind die Mittelwerte pro Parameter. Die farbigen Punkte repräsentieren die einzelnen Beobachtungen pro Parameter. Anmerkung: SSL = Lorey'sche Höhe Strauchschicht, BSL= Lorey'sche Höhe Baumschicht, WBL= Lorey'sche Höhe Waldbestand.	291
Abbildung 161 Boxplot Ergebnisse für die Parameter Höhe, BHD, HD-Wert und Stammzahl der Baumarten Buche (FASY), Lärche (LADE) und Fichte (PIAB) zwischen BFW (rot)- und ÖBf (hellblau) Stichprobepunkten im Untersuchungsgebiet TEZG 1.4. Die in den Boxplots dargestellten Zahlen entsprechen den jeweiligen Mittelwerten. Die Buchstabenkennzeichnung zeigt signifikante Unterschiede zwischen den Stichprobenerhebungen BFW und ÖBf	293
Abbildung 162 Vertikale Verteilung der mit ULS (oberste Reihe), ALS (mittlere Reihe) und UAS-P (unterste Reihe) aufgenommenen / errechneten Punkte entlang der Profilschnitte durch ausgewählte <i>pilot subsets</i> (SPZ 25 – laubwalddominiert, <i>leaf-off</i> ; SPZ 35 – laubwalddominiert, <i>leaf-on</i> ; SPZ 64 – nadelwalddominiert)	296
Abbildung 163 Vertikale Verteilung der ULS-Punkte entlang der Profilschnitte durch die sechs <i>pilot subsets</i> unter <i>leaf-off</i> (Grüntöne, oberste Reihe), und <i>leaf-on</i> Bedingungen (Rottöne, unterste Reihe), sowie im nadelwalddominierten Bestand (blau, unterste Reihe)	298
Abbildung 164 Verteilung der Häufigkeiten der Nicht-Boden ULS-Punkte mit der Höhe ü.G. entlang der in Abbildung 163 dargestellten SPZ (Farben ident wie Abbildung 163)	299
Abbildung 165 Ergebnisse der top-down Prozessierung von <i>pilot subset</i> SPZ 28; VHM und Schummerung des DOM (oben links); Baumspitzen (blaue Punkte) und Kronenumrisse (grüne Linien) (oben rechts); ermittelte Baumhöhen - orange Punkte skaliert nach den in der Legende dargestellten Symbolgrößen (unten links)	302
Abbildung 166 Ergebnisse der <i>bottom-up</i> Kartierung von <i>pilot subset</i> SPZ 62; <i>skeletons</i> (orange Linien) der identifizierten Bäume (oben links); Stammpositionen (blaue Punkte) und annäherungsweise bestimmter Kronenumriss (blau straffierte Polygone) dieser Bäume (oben rechts) – im Hintergrund jeweils die UAS-Orthophotos; 3D-Ansicht der <i>pipes</i> der identifizierten Bäume von Norden, eingefärbt nach modelliertem Umfang von Stämmen / Ästen (rot – großer / blau – kleiner Umfang), ergänzt um die nach Intensität in Grautönen dargestellten ULS-Punktwolke (unten)	304
Abbildung 167 Gegenüberstellung der Ergebnisse der beiden Methoden zur Ermittlung dendrometrischer Indikatoren für die <i>pilot subsets</i> ; errechnete Baumpositionen aus <i>bottom-up</i> (blaue Punkte) und <i>top-down</i> (orange Punkte)	306

Abbildung 168 Vergleich der Baumanzahl (links) und Stammzahl pro Hektar (rechts) zwischen den beiden ULS-Methoden (bottom-up und top-down) sowie der Referenzstichprobe (in-situ) für den CSP7 m Probekreis in den sechs Pilotparzellen.....	309
Abbildung 169 2. Vergleich der Kronenbereiche (a) und der mittleren Baumhöhen (b) zwischen den ULS-Methoden (bottom-up, top-down) und der terrestrischen Stichprobe (in-situ) für die Probentypen CSP7 und WZP4. Im Rahmen der In-situ-Aufnahmen wurden keine Kronendaten erfasst	311
Abbildung 170 PRAs (blau) modelliert mit Variante D-3 (Modellierung nach autoATES mit LiDAR-VHM). Flächenanteil potenzieller Anbruchpixel an der Gesamtfläche des MEZG-Rindbach: 13,34 %	314
Abbildung 171 PRAs (blau) modelliert mit Variante D-2 (Modellierung nach autoATES mit P-VHM). Flächenanteil potenzieller Anbruchpixel an der Gesamtfläche des MEZG-Rindbach: 9,97 %	315
Abbildung 172 PRAs (blau) modelliert mit Variante D-1 (Modellierung nach autoATES ohne Berücksichtigung von Wald). Flächenanteil potenzieller Anbruchpixel an der Gesamtfläche des MEZG-Rindbach: 43,96 %.....	316
Abbildung 173 Unterschiede zwischen den PRAs, modelliert nach autoATES unter Verwendung des LiDAR-VHM (Variante D-3) bzw. des P-VHM (Variante D-2). Grün: Pixel, die auf Grundlage des LiDAR-VHM, jedoch nicht auf Grundlage des P-VHM als PRA ausgewiesen wurden. Pink: umgekehrter Fall	317
Abbildung 174 com4FlowPy-Simulationsergebnisse für die „Häuseleckgrabenlawine“ unter verschiedenen Modellparameterkombinationen (siehe Tabelle 22), abgeleitet aus dem LiDAR-VHM und P-VHM. Türkis: rekonstruierte Prozessfläche. Gelb–Rot: modellierte Prozessfläche und Intensität, dargestellt durch die Energielinienhöhe (z^δ); Gelb = geringe Intensität, Rot = hohe Intensität	319
Abbildung 175 com4FlowPy-Simulationsergebnisse für PRA-Szenario D-1 (ohne Waldwirkung) mit der Modellparameter-Kombination Var1-noFor ($\alpha = 24^\circ$; $zlim\delta = 270$ m; $Rstop = 0,001$). Blau: PRAs; Gelb-Rot: modellierte Prozessfläche und Intensität, dargestellt durch die Energielinienhöhe $z\delta$	322
Abbildung 176 com4FlowPy-Simulationsergebnisse für PRA-Szenario D-3 (mit Waldwirkung) mit der Modellparameter-Kombination Var1-withFor ($\alpha = 24^\circ$; $zlim\delta = 270$ m; $Rstop = 0,001$; $\Delta for, max\alpha = 23^\circ$). Blau: PRAs; Gelb-Rot: modellierte Prozessfläche und Intensität, dargestellt durch die Energielinienhöhe $z\delta$	323
Abbildung 177 com4FlowPy-Simulationsergebnisse für PRA-Szenario D-1 (ohne Waldwirkung) mit der Modellparameter-Kombination Var3-noFor ($\alpha = 26^\circ$; $zlim\delta = 185$ m; $Rstop = 0,003$). Blau: PRAs; Gelb-Rot: modellierte Prozessfläche und Intensität, dargestellt durch die Energielinienhöhe $z\delta$	324

Abbildung 178 com4FlowPy-Simulationsergebnisse für PRA-Szenario D-3 (mit Waldwirkung) mit der Modellparameter-Kombination Var3-withFor ($\alpha = 26^\circ$; $zlim\delta = 185$ m; $Rstop = 0,003$; $\Delta for, max\alpha = 23^\circ$). Blau: PRAs; Gelb-Rot: modellierte Prozessfläche und Intensität, dargestellt durch die Energielinienhöhe $z\delta$	325
Abbildung 179 Gerinnesystem inklusive Flussordnungszahlen nach Strahler (1964) des gesamten MEZG-Rindbach.	329
Abbildung 180 Gerinnemorphologische Beispiele nach Flussordnungszahlen nach Strahler (1964).	330
Abbildung 181 Geschiebepotential des Rindbaches – Stand Juni 2023.	331
Abbildung 182 Abstrahiertes Gerinnesystem hm 77 – hm 50 des Rindbaches.	332
Abbildung 183 Abstrahiertes Gerinnesystem hm 50 - Mündung des Rindbaches in den Traunsee.	333
Abbildung 184 Kornverteilungskurven Gerinneabschnitt nahe Wildholzrechen	334
Abbildung 185 Kornverteilungskurve im Ablagerungsbereich vor Filterbauwerk unterhalb des Wildholzrechens	335
Abbildung 186 Vorläufige Wildholzdispositionskarte für das MEZG Rindbach. Rötliche Farbtöne = hohe Disposition, grüne Farbtöne = keine Disposition, blaue Farbtöne = hohe Verbisstätigkeit in Gerinnenähe.	338
Abbildung 187 Die wichtigsten Ergebnisse und Stichworte des Fachaustausches Schutzwald als Mindmap (Original unter: zenodo.org/mindmap)	381
Abbildung 188 Poster über das Mustereinzugsgebiet Rindbach für die Lange Nacht der Forschung (Original unter: zenodo.org/LangeNachtderForschung_Poster)	382
Abbildung 189 Allgemeines Poster bezüglich des Modelleinzugsgebiet Rindbach (Original unter: zenodo.org/Poster)	383
Abbildung 190 Schematische Darstellung der Arbeitsschritte für die Berechnung dendrometrischer Parameter aus ULS-Daten mittels einem <i>top-down</i> Verfahren	389
Abbildung 191 Schematische Darstellung der Arbeitsschritte für die Berechnung	390
Abbildung 192 Schematische Darstellung der Arbeitsschritte für die Berechnung dendrometrischer Parameter aus ULS-Daten mittels einem <i>bottom-up</i> Verfahren – Teil B	391
Abbildung 193 PRAs (blau) modelliert mit Variante A (Gutachterlich). Flächenanteil potenzieller Anbruchpixel an der Gesamtfläche des MEZG-Rindbach: 7,85 %	392
Abbildung 194 PRAs (blau) modelliert mit Variante B-1 (Basierend auf dem Projekt „GRAVIPROFOR“ - Dispositionsklasse 3). Flächenanteil potenzieller Anbruchpixel an der Gesamtfläche des MEZG-Rindbach: 3,76 %	393

Abbildung 195 PRAs (blau) modelliert mit Variante B-2 (Basierend auf dem Projekt „GRAVIPROFOR“ - Dispositionsklassen 3 und 2). Flächenanteil potenzieller Anbruchpixel an der Gesamtfläche des MEZG-Rindbach: 24,35 %.....	394
Abbildung 196 PRAs (blau) modelliert mit Variante B-3 (Basierend auf dem Projekt „GRAVIPROFOR“ - Dispositionsklassen 3, 2 und 1). Flächenanteil potenzieller Anbruchpixel an der Gesamtfläche des MEZG-Rindbach: 44,98 %.....	395
Abbildung 197 PRAs (blau) modelliert mit Variante C-1 (Kombination aus nDOM und Richtwerten aus NaiS; mind. 400 m ² Aggregate). Flächenanteil potenzieller Anbruchpixel an der Gesamtfläche des MEZG-Rindbach: 15,03 %.....	396
Abbildung 198 PRAs (blau) modelliert mit Variante C-2 (Kombination aus nDOM und Richtwerten aus NaiS; mind. 900 m ² Aggregate). Flächenanteil potenzieller Anbruchpixel an der Gesamtfläche des MEZG-Rindbach: 13,31 %.....	397
Abbildung 199 com4FlowPy-Simulationsergebnisse für PRA-Szenario D-1 (ohne Waldwirkung) mit der Modellparameter-Kombination Var2-noFor ($\alpha = 26^\circ$; $zlim\delta = 215$ m; $Rstop = 0,003$). Blau: PRAs; Gelb-Rot: modellierte Prozessfläche und Intensität, dargestellt durch die Energielinienhöhe $z\delta$	397
Abbildung 200 com4FlowPy-Simulationsergebnisse für PRA-Szenario D-2 (mit Waldwirkung, P-VHM) mit der Modellparameter-Kombination Var1-withFor ($\alpha = 24^\circ$; $zlim\delta = 270$ m; $Rstop = 0,001$; $\Delta for, max\alpha = 23^\circ$). Blau: PRAs; Gelb-Rot: modellierte Prozessfläche und Intensität, dargestellt durch die Energielinienhöhe $z\delta$	398
Abbildung 201 com4FlowPy-Simulationsergebnisse für PRA-Szenario D-2 (mit Waldwirkung, P-VHM) mit der Modellparameter-Kombination Var2-withFor ($\alpha = 25^\circ$; $zlim\delta = 215$ m; $Rstop = 0,003$; $\Delta for, max\alpha = 22^\circ$). Blau: PRAs; Gelb-Rot: modellierte Prozessfläche und Intensität, dargestellt durch die Energielinienhöhe $z\delta$	399
Abbildung 202 com4FlowPy-Simulationsergebnisse für PRA-Szenario D-2 (mit Waldwirkung, P-VHM) mit der Modellparameter-Kombination Var3-withFor ($\alpha = 26^\circ$; $zlim\delta = 185$ m; $Rstop = 0,003$; $\Delta for, max\alpha = 21^\circ$). Blau: PRAs; Gelb-Rot: modellierte Prozessfläche und Intensität, dargestellt durch die Energielinienhöhe $z\delta$	400
Abbildung 203 com4FlowPy-Simulationsergebnisse für PRA-Szenario D-2 (mit Waldwirkung, P-VHM) mit der Modellparameter-Kombination Var4-withFor ($\alpha = 26^\circ$; $zlim\delta = 185$ m; $Rstop = 0,003$; $\Delta for, max\alpha = 21^\circ$, skipForDist = 30 m). Blau: PRAs; Gelb-Rot: modellierte Prozessfläche und Intensität, dargestellt durch die Energielinienhöhe $z\delta$	401
Abbildung 204 com4FlowPy-Simulationsergebnisse für PRA-Szenario D-3 (mit Waldwirkung, LiDAR-VHM) mit der Modellparameter-Kombination Var2-withFor ($\alpha = 25^\circ$; $zlim\delta = 215$ m; $Rstop = 0,003$; $\Delta for, max\alpha = 22^\circ$). Blau: PRAs; Gelb-Rot: modellierte Prozessfläche und Intensität, dargestellt durch die Energielinienhöhe $z\delta$	402

Abbildung 205 com4FlowPy-Simulationsergebnisse für PRA-Szenario D-3 (mit Waldwirkung, LiDAR-VHM) mit der Modellparameter-Kombination Var4-withFor ($\alpha = 26^\circ$; $z_{lim\delta} = 185$ m; $R_{stop} = 0,003$; $\Delta for, max\alpha = 21^\circ$, skipForDist = 30 m). Blau: PRAs; Gelb-Rot: modellierte Prozessfläche und Intensität, dargestellt durch die Energielinienhöhe $z\delta$ 403

Literaturverzeichnis

- Adhikari, A. / Montes, C.R. / Peduzzi, A.:** A Comparison of Modeling Methods for Predicting Forest Attributes Using Lidar Metrics. *Remote Sensing* 15, 1–23, 2023.
- Adili, B./ Aouni, M.H.E./ Balandier, P.:** Unravelling the influence of light, litter and understorey vegetation on *Pinus pinea* natural regeneration. *Forestry* 86, 297–304, 2013.
- Aicardi, I. / Garbarino, M. / Lingua, A. / Lingua, E. / Marzano, R. / Piras, M.:** Monitoring post-fire forest recovery using multi-temporal Digital Surface Models generated from different platforms. *EARSeL eProceedings*, 15(1), 1-8., 2016.
- Åkerblom, M. / Kaitaniemi, P.:** Terrestrial laser scanning: a new standard of forest measuring and modelling? *Annals of Botany* 128, 653–662. 2021.
- Amerhauser, E.:** Einfluss von Forststraßen auf die Abflussdynamik im MEZG Rindbach. Eine hydrologische Simulation mit NASIM und QGIS-gestützter Analyse. Masterarbeit. Wien: Institut für Alpine Naturgefahren und Forstliches Ingenieurwesen, Universität für Bodenkultur Wien, p. 110. 2025.
- Andersen, H.-E. / Reutebuch, S.E. / McGaughey, R.J.:** A comparison of forest canopy models derived from LiDAR and InSAR data in Pacific Northwest conifer forest. *Proceedings of ISPRS XXXIV*, 3/W13, 2003. https://www.isprs.org/proceedings/xxxiv/3-w13/papers/Andersen_ALSDD2003.pdf
- Anderson M.C.:** Stand structure and light penetration. II. A theoretical analysis, *J. Appl. Ecol.* 3, 41–54, 1996.
- Anderson, M.C.:** Light relations of terrestrial plant communities and their measurement *Biological Reviews* 39:425-486, 1964.
- Apostol, B. / Petrila, M. / Lorent, A. / Ciceu, A. / Gancz, V. / Badea, O.:** Species discrimination and individual tree detection for predicting main dendrometric characteristics in mixed temperate forests by use of airborne laser scanning and ultra-high-resolution imagery. *Science of The Total Environment* 698, 1–17, 2020.

Arrizza, S. / Marras, S. / Ferrara, R. / Pellizzaro, G.: Terrestrial Laser Scanning (TLS) for tree structure studies: a review of methods for wood-leaf classifications from 3D point clouds. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 36, 101364, 2024.

Backhouse, F. / Louiser, J.D.: Silvicultural systems research: Wildlife tree problem analysis. Min. For. Environ., Lands and Parks, Wildlife Tree Committee, Victoria, B.C. Canada, 1991.

Balestra, M. / Marselis, S. / Sankey, T.T. Cabo C. / Liang, X. / Mokroš, M. Peng X. / Singh, A. / Stereńczak, K. Vega C. / Vincent, G. / Hollaus, M.: LiDAR Data Fusion to Improve Forest Attribute Estimates: A Review. *Curr. For. Rep.* 10, 281–297, 2024.

Bathurst, J. C.: Flow resistance estimation in mountain rivers. *Journal of Hydraulic Engineering* (Vol. 111, No.4), 625–643, 1985.

Bezzola, G. R.: Fließwiderstand und Sohlenstabilität natürlicher Gerinne: unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses der relativen Überdeckung [ETH Zurich]. DataCite, 2002.

Bienert, A. / Georgi, L. / Kunz, M. / Maas, H.-G. / Von Oheimb, G.: Comparison and combination of mobile and terrestrial laser scanning for natural forest inventories. *Forests* 9, 395, 2018.

Boulanger, V. / Baltzinger, C. / Saïd, S. / Ballon, P. / Picard, J.-F. / Dupouey, J.-L.: Ranking temperate woody species along a gradient of browsing by deer. *For. Ecol. Manage.* 258, 1397–1406, 2009.

Borsah, A.A. / Nazeer, M. Wong M.S.: LIDAR-Based Forest Biomass Remote Sensing: A Review of Metrics, Methods, and Assessment Criteria for the Selection of Allometric Equations. *Forests* 14, 1–22, 2023.

Bouvier, M. / Durrieu, S. / Fournier, R.A. / Renaud, J.-P.: Generalizing predictive models of forest inventory attributes using an area-based approach with airborne LiDAR data. *Remote Sensing of Environment* 156, 322–334, 2015.

Boyd, D. S. / Danson F. M.: Satellite remote sensing of forest resources: three decades of research development. *Progress in Physical Geography*, 29(1), 1-26, 2005.

Bray, D.: Estimating Average Velocity in Gravel-Bed Rivers. Journal of the Hydraulics Division, 105(9), 1103–1122. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0005270>, 1979.

Brede, B. / Calders, K. / Lau, A. / Raunonen, P. / Bartholomeus, H. M. / Herold, M. / Kooistra, L.: Non-destructive tree volume estimation through quantitative structure modelling: Comparing UAV laser scanning with terrestrial LIDAR. Remote Sensing of Environment, 233, 111355, 2019.

Bremer, M. / Wichmann, V. / Rutzinger, M.: Multi-temporal fine-scale modelling of Larix decidua forest plots using terrestrial LiDAR and hemispherical photographs. Remote Sensing of Environment 206, 189–204, 2018.

Brožová, N. / Fischer, J.-T. / Bühler, Y. / Bartelt, P. / Bebi P.: Determining forest parameters for avalanche simulation using remote sensing data. Cold Regions Science and Technology 1–31, 2019.

Bruggisser, M. / Hollaus, M. / Kükenbrink, D. / Pfeifer, N.: Comparison of forest structure metrics derived from UAV LIDAR and ALS data. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences IV-2-W5, 325–332, 2019.

Buckland, S.T. / Borchers, D.L. / Johnston, A. / Henrys, P.A. / Marques, T.A.: Line transect methods for plant surveys. Biometrics, 63, 989-998, 2007.

BMLRT: eHYD – Hydrographisches Datenportal Österreichs. Available at: <https://ehyd.gv.at/> (Accessed: 13 May 2025).

Cai, S. / Zhang, W. / Zhang, S. / Yu, S. / Liang, X.: Branch architecture quantification of large-scale coniferous forest plots using UAV-LiDAR data. Remote Sensing of Environment 306, 1–22, 2024.

Canfield, R.H.: Application of the line interception method in sampling range vegetation. J. Forestry (39)389-394, 1941.

Canham, C. D. / Finzi, A. C. / Pacala, S. W. / Burbank, D. H.: Causes and consequences of resource heterogeneity in forests: Interspecific variation in light transmission by canopy trees. Canadian Journal of Forest Research, 24(2), 337-349, 1994.

Castorena, J.: Learning Neural Radiance Fields of Forest Structure for Scalable and Fine Monitoring. In: Calvo, H., Martínez-Villaseñor, L., Ponce, H. (Eds.). *Advances in Soft Computing: 22nd Mexican International Conference on Artificial Intelligence, MICA 2023*, Yucatán, Mexico, November 13–18, 2023, Proceedings, Part II, Lecture Notes in Computer Science. Springer Nature Switzerland, Cham, 2024.

Chen J.M. / Black T.A. / Adams R.S.: Evaluation of hemispherical photography for determining plant area index and geometry of a forest stand, *Agric. For. Meteorol.* 56, 129–143, 1991.

Chen, S. / Liu H. / Feng Z. / Shen C. / Chen P.: Applicability of personal laser scanning in forestry inventory. *PLoS ONE* 14, e0211392, 0211.

Coops, N. C. / Tompalski, P. / Goodbody, T. R. / Queinnec, M. / Luther, J. E. / Bolton, D. K. / White, J.C. / Wulder, M.A. / van Lier, O.R. / Hermosilla, T.: Modelling lidar-derived estimates of forest attributes over space and time: A review of approaches and future trends. *Remote Sensing of Environment*, 260, 112477, 2021.

Côté, S. D. / Rooney, T. P. / Tremblay, J. P. / Dussault, C. / Waller, D. M.: Ecological Impacts of Deer Overabundance. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 35(1), 113-147, 2004.

Dansgaard, W.: Stable isotopes in precipitation. *Tellus* 16, 436–468, 1964.

D’Amboise, C.J.L. / Neuhauser, M. / Teich, M. / Huber, A. / Kofler, A. / Perzl, F. et al.: Flow-Py v1.0: a customizable, open-source simulation tool to estimate runout and intensity of gravitational mass flows. *Geosci Model Dev.*, 15(6): 2423–2439, 2022

D’Amboise, C.J.L. / Teich, M. / Hormes, A. / Steger, S. / Berger, F.: Modeling protective forests for gravitational natural hazards and how it relates to risk-based decision support tools. In: Teich M, Accastello C, Perzl F, Kleemayr K, editors. *Protective forests as Ecosystem-based solution for Disaster Risk Reduction (Eco-DRR)*. London: IntechOpen, 2021. <https://doi.org/10.5772/intechopen.99510>

Dash, J.P., / Watt, M. / Bhandari, S. / Watt, P.: Characterising forest structure using combinations of airborne laser scanning, RapidEye satellite imagery and environmental variables. *Forestry*, 88, 2015.

Duvillier, C. / Eckert, N. / Evin, G. / Deschâtres, M.: Development and evaluation of a method to identify potential release areas of snow avalanches based on watershed delineation. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 23, 1383–1408, 2023.
<https://doi.org/10.5194/nhess-23-1383-2023>

Ecke, S. / Dempewolf, J. / Frey, J. / Schwaller, A. / Endres, E. / Klemmt, H.-J. / Tiede, D. / Seifert, T.: UAV-Based Forest Health Monitoring: A Systematic Review. *Remote Sensing* 14, 1–45, 2022.

Eitel, J. U. / Höfle, B. / Vierling, L. A. / Abellán, A. / Asner, G. P. / Deems, J. S. / Glennie, C. L., Joerg, P. C. / LeWinter, A. L. / Magney, T S. / Mandelburger, G. / Morton, D. C. / Müller, J. / Vierling, K. T.: Beyond 3-D: The new spectrum of lidar applications for earth and ecological sciences. *Remote Sensing of Environment*, 186, 372-392, 2016.

Ewald, J. / Braun, L. / Zeppenfeld, T. / Jehl, H. / Heurich, M.: Estimating the distribution of forage mass for ungulates from vegetation plots in Bavarian Forest National Park. *Tuexenia* 34, 53–70, 2014.

Facelli, J.M. / Pickett, S.T.A.: Plant litter: its dynamics and effects on plant community structure. *Bot. Rev.* 57 (1), 1–32, 1991.

Fassnacht, F.E. / White, J.C. / Wulder, M.A. / Næsset, E.: Remote sensing in forestry: current challenges, considerations and directions. *Forestry: An International Journal of Forest Research* 97, 11–37, 2024.

Fernandez de Villaran San Juan, R. / Domingo-Santos, JM.: The role of GIS and LiDAR as tools for sustainable forest management. *Frontiers in Forest Ecosystems* (1)124-148, 2018.

Fornara, D. A. /Tilman, D.: Plant functional composition influences rates of herbivory. *Ecology*, 89(10), 2624-2634, 2008.

Forrester, D. I. / Bauhus, J.: A review of processes behind diversity—productivity relationships in forests. *Current Forestry Reports*, 2(1), 45-61, 2016.

Fraser, B.T. / Congalton, R.G.: Estimating primary forest attributes and rare community characteristics using Unmanned aerial systems (UAS): an enrichment of conventional forest inventories. *Remote Sensing* 13, 1–22, 2021.

- Fraver, S. / Ducey, M.J. / Woodall, C.W. / D'Amato, A.W. / Milo, A.M. / Palik, B.J.:** Influence of transect length and downed woody debris abundance on precision of the line-intersect sampling method. *For. Ecosyst.* 5(39), 2018.
- Frehner, M. / Wasser, B. / Schwitter, R.:** Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion. Bern: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), 2005.
- Fritz, A. / Kattenborn, T. / Koch B.:** UAV-based photogrammetric point clouds—Tree stem mapping in open stands in comparison to terrestrial laser scanner point clouds, in: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. pp. 141–146, 2013.
- Galipeau, C. / Kneeshaw, D. / Bergeron, Y.:** White Spruce and Balsam Fir Colonisation of a Site in the Southeastern Boreal Forest as Observed 68 Years after Fire. *Can. J. For. Res.* 1997, 27, 139, 1997.
- Ganatsas, P.P. / Tsakalimi, M.N.:** Effect of light conditions and salinity on germination behaviour and early growth of umbrella pine (*Pinus pinea* L.) seed. *J. Hortic. Sci. Biotech.* 82, 605–610, 2007.
- Gill, R. M. A.:** A review of damage by mammals in north temperate forests: 3. Impact on trees and forests. *Forestry*, 65(2), 145-169, 1992.
- Gašparović, M. / Seletković, A. / Berta, A. / Balenović, I.:** The evaluation of photogrammetry-based DSM from low-cost UAV by LiDAR-based DSM. *South-east European Forestry (SEEFOR)* 8(2), 117–125, 2017. <https://hrcak.srce.hr/file/282364>
- Getzin, S. / Nuske, R.S. / Wiegand, K.:** Using Unmanned Aerial Vehicles (UAV) to Quantify Spatial Gap Patterns in Forests: *Remote Sens–Basel* 6(8): 6988–7004. 2014.
- Ginzler, C. / Adams, M. / Hormes, A. / Lechner, V.:** D.T1.5.2 Applying remote sensing techniques to identify and monitor forest disturbances (No. Activity 1 PRONA), Interreg Alpine Space project GreenRisk4ALPs (ASP635). Innsbruck, Austria, 2019.

Goodbody / T.R.H. / Coops, N.C. / Marshall, P.L. / Tompalski, P. / Crawford, P.:

Unmanned aerial systems for precision forest inventory purposes: a review and case study. *For. Chron.* 93 (01), 71–81, 2017.

Hackenberg, J. / Spiecker, H. / Calders, K. / Disney, M. / Raunonen, P.: SimpleTree —An efficient open source tool to build tree models from TLS clouds. *Forests* 6, 4245–4294, 2015.

Hackenberg, J. Kim C. / Demol, M. / Raunonen, P. / Piboule, A. / Mathias, D.:

SimpleForest - a comprehensive tool for 3d reconstruction of trees from forest plot point clouds. 2021.

Hasenauer, H. / Monserud, R. A.: A crown ration for Austrian forests. *Forest Ecology and Management*, 84, 49-60, 1996.

Heim, A.: Bergstürze und Menschenleben. Beiblatt zur Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich, Zürich, Fretz & Wasmuth, 1932.

Hell, M. / Brandmeier, M. / Briechle, S. / Krzystek, P.: Classification of tree species and standing dead trees with LiDAR point clouds using two deep neural networks: PointCNN and 3DmFV-Net. *PFG* 90, 103–121, 2022.

Hemund, C. / Weingartner, R. / Dobmann, J. / Markart, G. / Kohl, B.: Flood assessment in small catchments - Evaluating an Austrian method in Switzerland. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 54. Jg., Heft 3, 156-168, 2010.

Holmgren, P. / Thuresson, T.: Satellite remote sensing for forestry planning—A review. *Scandinavian Journal of Forest Research* 13, 90–110, 1998.

Holopainen, M. / Kankare, V. / Vastaranta, M. / Liang, X. / Lin Y. / Vaaja, M. / Yu X. / Hyypä, J. / Hyypä, H. / Kaartinen, H. / Kukko, A. / Tanhuanpää, T. / Alho, P.: Tree mapping using airborne, terrestrial and mobile laser scanning – A case study in a heterogeneous urban forest. *Urban Forestry & Urban Greening* 12, 546–553, 2013.

Huang, H. / Tian, G. / Chen, C.: Evaluating the Point Cloud of Individual Trees Generated from Images Based on Neural Radiance Fields (NeRF) Method. *Remote Sensing* 16, 967, 2024.

Huber, A. / Hesselbach, C. / Oesterle, F. / Neuhauser, M. / Adams, M. / Plörer, M. / Stephan, L. / Toft, H. / Sykes, J. / Mitterer, C. / Fischer, J.-T.: AutoATES Austria – testing and application of an automated model-chain for avalanche terrain classification in the Austrian Alps. Proceedings, International Snow Science Workshop, Bend, OR, USA, 1272–1278, 2023. <http://arc.lib.montana.edu/snow-science/item/2989>

Huber, A. / Saxer, L. / Spannring, P. / Hesselbach, C. / Neuhauser, M. / D’Amboise, C. / Teich, M.: Regional-scale avalanche modeling with com4FlowPy – potential and limitations for considering avalanche-forest interaction along the avalanche track. Proceedings, International Snow Science Workshop, Tromsø, Norway, 587–594, 2024. <https://arc.lib.montana.edu/snow-science/item.php?id=3194>

Hübl J. / Eisl J. / Scheidl C. / Chiari M. / Wiesinger T. / Heiser M. / Schimmel A. / Trojer M. / Reischenböck G.: Ereignisdokumentation 2013. IAN Report 155, Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur –Wien, 2013.

Issler, D. / Gleditsch Gisnas, K. / Gauer, P. / Glimsdal, S. / Domaas, U. / Sverdrup-Thygeson, K.: Naksin – a new approach to snow avalanche hazard indication mapping in Norway. SSRN, 2023. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4530311>

Jaakkola, A. / Hyypä, J. / Kukko, A. / Yu, X. / Kaartinen, H. / Lehtomäki, M. / Lin., Y.: A Low-Cost Multi-Sensoral Mobile Mapping System and Its Feasibility for Tree Measurements. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 65 (2010): 514–522, 2010.

Jonsson, B. G. / Ekström, M. / Esseen, P.-A. / Grafström, A. / Ståhl, G. / Westerlund, B.: Dead wood availability in managed Swedish forests – Policy outcomes and implications for biodiversity. Forest Ecology and Management 376:174–182, 2016.

Khorram, S. / Koch, F. H. / Van der Wiele, C. F. / Nelson, S. A.: Remote sensing. Springer Science & Business Media, 2012.

Keulegan, G. H.: Laws of turbulent flow in open channels. Journal of Research (Research Paper 1151), 1938.

Khorram, S. / Koch, F. H. / Van der Wiele, C. F. / Nelson, S. A.: Remote sensing. Springer Science & Business Media, 2012.

Koenderink, J. J. and van Doorn, A. J.: Affine structure from motion, *J. Opt. Soc. Am. A* 8, 377–385, 1991.

Kobe, R. K. / Pacala, S. W. / Silander Jr, J. A. / Canham, C. D.: Juvenile tree survivorship as a component of shade tolerance. *Ecological Applications*, 5(2), 517-532, 1995.

Korhonen, K. T. / Ahola, A. / Heikkinen, J. / Henttonen, H. M. / Hotanen, J.-P. / Ihalainen, A. / Melin, M. / Pitkänen, J. / Räty, M. / Sirviö, M. and others.: Forests of Finland 2014–2018 and their development 1921–2018. *Silva Fennica* 55, 2021.

Kovanič, Ľ. / Topitzer, B. / Peťovský, P. / Blišťan, P. / Gergeľová, M.B. / Blišťanová, M.: Review of photogrammetric and lidar applications of UAV. *Applied Sciences* 13, 1–37, 2023.

Kozłowski, T.T. / Pallardy, S.G.: Acclimation and Adaptive Responses of Woody Plants to Environmental Stresses. *Bot. Rev.* 2002, 68, 270, 2002.

Kuijper, D. P. / Cromsigt, J. P. / Churski, M. / Adam, B. / Jędrzejewska, B. / Jędrzejewski, W.: Do ungulates preferentially feed in forest gaps in European temperate forest? *Forest Ecology and Management*, 304, 123-131, 2013.

Kukkonen, M. / Maltamo, M. / Korhonen, L. / Packalen, P.: Evaluation of UAS LiDAR data for tree segmentation and diameter estimation in boreal forests using trunk-and crown-based methods. *Canadian Journal of Forest Research*, 52(5), 674-684, 2022.

Kunstler, G. / Falster, D. / Coomes, D. A. / Hui, F. / Kooyman, R. M. / Laughlin, D. C. / Vieilledent, G.: Plant functional traits have globally consistent effects on competition. *Nature*, 529(7585), 204-207, 2016.

Kupferschmid, A.D.: Selective browsing behaviour of ungulates influences the growth of *Abies alba* differently depending on forest type. *For. Ecol. Manage.* 429, 317–326, 2018.

Kuuluvainen, T. / Kalmari, R.: Regeneration microsites of *Picea abies* seedlings in a windthrow area of a boreal old-growth forest in southern Finland. — *Ann. Bot. Fennici* 40: 401–413, 2003.

Kuuluvainen, T. / Aakala, T.: Natural forest dynamics in boreal Fennoscandia: A review and classification. *Silva Fennica*, 45(5), 823–841, 2011.

Kuželka, K. / Slavík, M. / Surový, P.: Very high density point clouds from UAV laser scanning for automatic tree Stem detection and direct diameter measurement. *Remote Sensing* 12, 1236, 2018.

Kuželka, K. / Surový, P.: Mapping forest structure using UAS inside flight capabilities. *Sensors*, 18(7), 2245, 2018.

Laserdata: Websites des Unternehmens Laserdata mit Informationen zu deren Produkte allgemein (<https://www.laserdata.at>) und der verwendeten Software LIS Pro 3D (<https://lispro3d.com>) (letzter Zugriff am 23.07.2025).

Lechner, V. / Scheidl, C. / Schlögl, M. / Baldauf, E. / Huber, A. / Kohl, B. / Klebinder, K. / Meißl, G. / Markart, G.: Hydrological drivers of surface runoff during heavy rainfall experiments in Alpine ski regions. *Journal of Hydrology* (eingereicht).

Lechner, V. / Simon, A. / Sotier, B. / Adams, M.: Monitoring einer Waldbrandfläche mit Methoden der Nahbereichserkundung. *Waldbrände in den Nordtiroler Kalkalpen*, Innsbrucker Geographische Studien 41, 209–217, 2019.

Lehmann / J.R.K. / Nieberding, F. / Prinz, T. / Knoth, C.: Analysis of Unmanned Aerial System-Based CIR Images in Forestry—A New Perspective to Monitor Pest Infestation Levels. *Forests* 6, 594–612, 2015.

Liao, J. / Zhou, J. / Yang, W.: Comparing LiDAR and SfM digital surface models for three land cover types. *Open Geosciences* 13, 1–10, 2021. <https://doi.org/10.1515/geo-2020-0257>

Lin, Y. J. / Hyypä, A. / Jaakkola, A.: Mini-UAV-Borne LIDAR for Fine-Scale Mapping. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 8 (3): 426–430, 2011.

Lingua, E. / Marchi, N. / Bettella, F. / Costa, M. / Pirotti, F. / Marco, P. / Garbarino, M. / Morresi, D. / Raffaella, M.: Natural disturbances and protection forests: at the cutting edge of remote sensing technologies for the rapid assessment of protective effects against

rockfall. In Protective forests as Ecosystem-based solution for Disaster Risk Reduction (ECO-DRR). IntechOpen, 2021.

Lisein, J. / Linchant, J. / Lejeune, P. / Bouché, P. / Vermeulen, C.: Aerial surveys using an unmanned aerial system (UAS): comparison of different methods for estimating the surface area of sampling strips: Trop Conserv Sci 6(4): 506 - 520. 2013.

Maggioni, M. / Gruber, U.: The influence of topographic parameters on avalanche release dimension and frequency. Cold Regions Science and Technology 37, 407–419, 2003.
[https://doi.org/10.1016/S0165-232X\(03\)00080-6](https://doi.org/10.1016/S0165-232X(03)00080-6)

Mandelburger, G. / Hollaus, M. / Glira, P. / Wieser, M. / Milenković, M.: First examples from the RIEGL VUX-SYS for forestry applications. Proceed. SilviLaser, 2015, 105-107, 2015.

Maniak, U.: Hydrologie und Wasserwirtschaft (7. Aufl. 2016). Springer, Berlin – Heidelberg, 2017.

Markart G. / Kohl, B. / Sotier, B. / Klebinder, K. / Schauer, T. / Bunza, G. / Pirkl, H. / Stern, R.: A Simple Code of Practice for the Assessment of Surface Runoff Coefficients for Alpine Soil-/Vegetation Units in Torrential Rain (Version 2.0). Report in the frame of the Interreg-SEE-Project CC-WaterS (WP7 - Water Supply Management Measures, Act 7.1), 2011.
https://www.bfw.gv.at/wp-content/uploads/BFW_prov_code_of_practice_23_12_2011-1.pdf

Markart, G. / Klingsbigl, D. / Lechner, V. / Perzl, F. / Rössel, M. / Rössler, T. / Bunza, G. / Graf, A. / Kohl B. / Meißl, G. / Nagl, F. / Scheidl, C. / Suntinger, K. / Werner, N.: Endbericht Projekt ITAT4041-BLÖSSEN. Auswirkungen verzögerter Wiederbewaldung im Schutzwald auf die Sicherheit vor Naturgefahren (insbesondere Abflussbildung). BFW, UIBK, BOKU, 2020.

Markart, G. / Kohl B.: Starkregensimulation und bodenphysikalische Kennwerte als Grundlage der Abschätzung von Abfluss- und Infiltrationseigenschaften alpiner Boden-/Vegetationseinheiten, 1995.

Markart, G. / Kohl, B. / Sotier, B. / Schauer, T. / Bunza, G. / Stern, R.: Provisorische Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes auf alpinen Boden-

/Vegetationseinheiten bei konvektiven Starkregen (Version 1.0). Bundesamt und Forschungszentrum für Wald, 2004.

Markart, G. / Römer, A. / Bieber, G. / Pirkl, H. / Klebinder, K. / Hörfarter, C. / Ahl, A. / Ita, A. / Jochum, B. / Kohl, B. / Meissl, G. / Motschka, K. / Ottowitz, D. / Schattauer, I. / Sotier, B. / Strasser, M. / Suntinger K. / Winkler E.: Abschätzung der Bandbreiten von Fließgeschwindigkeiten des oberflächennahen Zwischenabflusses in alpinen Einzugsgebieten. Endbericht - 3. Projektjahr - an die Österreichische Akademie der Wissenschaften (ÖAW), Nationalkomitee Hydrologie Österreichs (IHP), 2013. ISBN-Online: 978-3-7001-7392-2; doi:10.1553/Shallow
<https://epub.oeaw.ac.at/0xc1aa5576%20x002dfd06.pdf>

Markov, K. / Huber, A. / Panayotov, M. / Hesselbach, C. / Spannring, P. / Fischer, J.-T. / Teich, M.: Machine learning for automated avalanche terrain exposure scale (ATES) classification. EGU sphere [preprint], 2025. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-2143>

Martínez-de Dios, J.R. / Merino, L. / Caballero, F. / Ollero, A.: Automatic Forest-Fire Measuring Using Ground Stations and Unmanned Aerial Systems. Sensors 11, 6328–6353, 2011.

Maser, C. / Anderson, R.G. / Cromack, K. / Williams, J.T. / Martin, R.E.: Dead and down woody material. In: Wildlife habitats in managed forests: The Blue Mountains of Oregon and Washington. Ed. J.W. Thomas. US Department of Agriculture Forest Service, Washington, D.C. pp. 78-95.1979. Available from
<http://hdl.handle.net/2027/uiug.30112019256475?urlappend=%3Bseq=84>

Mayerhofer, C. / Meißl, G. / Klebinder, K. / Kohl, B. / Markart, G.: Comparison of the results of a small-plot and a large-plot rainfall simulator – Effects of land use and land cover on surface runoff in Alpine catchments. CATENA, 156, 184-196, 2017.

McClung, D.M. / Gauer, P.: Maximum frontal speeds, alpha angles and deposit volumes of flowing snow avalanches. Cold Regions Science and Technology 153, 78–85, 2018.

Meißl, G. / Klebinder, K. / Zieher, T. / Lechner, V. / Kohl, B. / Markart, G.: Influence of antecedent soil moisture content and land use on the surface runoff response to heavy rainfall simulation experiments investigated in Alpine catchments. Heliyon, 9(8), 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18597>

METER Group AG: HYPROP User Manual: Laboratory evaporation method for determining soil hydraulic properties. München, Deutschland: METER Group AG, 2023b.

METER Group AG: KSAT User Manual: Measuring saturated hydraulic conductivity. München, Deutschland: METER Group AG, 2023 a.

Michez, A. / Morelle, K. / Lehaire, F. / Widar, J. / Authelet, M. / Vermeulen, C. / Lejeune, P.: Use of unmanned aerial system to assess wildlife (*Sus scrofa*) damage to crops (*Zea mays*): *Journal of Unmanned Vehicle Systems* 4(4): 266–275. 2016.

Möst, L. / Hothorn, T. / Müller, J. / Heurich, M.: Creating a landscape of management: unintended effects on the variation of browsing pressure in a national park. *For. Ecol. Manage.* 338, 46–56, 2015.

Näsi, R. / Honkavaara, E. / Blomqvist, M. / Lyytikäinen-Saarenmaa, P. / Hakala, T. / Viljanen, N. / Kantola, T. / Holopainen, M.: Remote sensing of bark beetle damage in urban forests at individual tree level using a novel hyperspectral camera from UAV and aircraft. *Urban Forestry & Urban Greening*, Special feature: Strategic gardens and gardening: Inviting a widened perspective on the values of private green space 30, 72–83, 2018.

Nestroy, O./Aust,G./Blum, W.E.H./Englisch, M./Hager, H./Herzberger, E./Kilian, W./ Nelhiebel, P./ Ortner, G./Pecina, E./Pehamberger, A./ Schneider, W./ Wagner, J.: Systematische Gliederung der Böden Österreichs; Österreichische Bodensystematik 2000 in der revidierten Fassung von 2011. Wien: Österreichische Bodenkundliche Gesellschaft 2011, Mitteilungen der Österreichischen Bodenkundlichen Gesellschaft Bd. 79

Neuhauser, M. / D’Amboise, C.J.L. / Teich, M. / Kofler, A. / Huber, A. / Fromm, R. et al.: Flow-Py: routing and stopping of gravitational mass flows (Version 1.0). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5027275>, 2021

Nestroy, O. / Aust, G. / Blum, W.E.H. / Englisch, M. / Hager, H. / Herzberger, E. / Kilian, W./ Nelhiebel, P./ Ortner, G./Pecina, E./Pehamberger, A./ Schneider, W./ Wagner, J.: Systematische Gliederung der Böden Österreichs; Österreichische Bodensystematik 2000 in der revidierten Fassung von 2011. Wien: Österreichische Bodenkundliche Gesellschaft 2011, Mitteilungen der Österreichischen Bodenkundlichen Gesellschaft Bd. 79.

Newesely, C. / Leitinger, G. / Zimmerhofer, W. / Kohl, B. / Markart, G. / Tasser, E. / Tappeiner, U.: Rain simulation in patchy landscapes: Insights from a case study in the Central Alps. CATENA, 127, 1-8, 2015.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.11.013>

Niinemets, Ü. / Valladares, F.: Tolerance to shade, drought, and waterlogging of temperate northern hemisphere trees and shrubs. Ecological Monographs, 76(4), 521–547, 2006.

Nothdurft, A. / Tockner, A. / Witzmann, S. / Gollob, C. / Ritter, T. / Kraßnitzer, R. / Stampfer, K. / Finley, A.O.: Spatial Prediction of Diameter Distributions for the Alpine Protection Forests in Ebensee, Austria, Using ALS/PLS and Spatial Distributional Regression Models. Remote Sensing 16, 24, 2024.

Panagos P. / Van Liedekerke M. / Jones A. / Montanarella L.: European Soil Data Centre: Response to European policy support and public data requirements. Land Use Policy, 29 (2), pp. 329-338, 2012.

Panagos, P. / Van Liedekerke / M., Borrelli, P. / Köninger, J. / Ballabio, C. / Orgiazzi, A. / Lugato, E. / Liakos, L. / Hervas, J. / Jones, A. / Montanarella, L.: European Soil Data Centre 2.0: Soil data and knowledge in support of the EU policies. European Journal of Soil Science, 73(6), e13315, 2022.

Parajuli, R. / Markwith, S. H.: Quantity is foremost but quality matters: A global meta-analysis of correlations of dead wood volume and biodiversity in forest ecosystems. Biological Conservation 283:110100, 2023.

Pearse, G.D. / Dash, J.P. / Persson, H.J. / Watt, M.S.: Comparison of high-density LiDAR and satellite photogrammetry for forest inventory. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. (142)257-267, 2018.

Perzl, F. / Bono, A. / Garbarino, M. / Motta, R.: Protective effects of forests against gravitational natural hazards. In: Teich M, Accastello C, Perzl F, Kleemayr K, editors. Protective forests as Ecosystem-based solution for Disaster Risk Reduction (Eco-DRR). London: IntechOpen, 2022. <https://doi.org/10.5772/intechopen.99506>

Perzl, F. / Huber, A.: GRAVIPROFOR. Verbesserung der Erfassung der Schutzwaldkulisse für die forstliche Raumplanung. Synthese und Zusammenfassung: Ziele, Grundlagen und Ergebnisse der Modellierung von Waldflächen mit Lawinen- und Steinschlag-Objektschutzfunktion. Technische Hilfe im Rahmen des österreichischen Programms LE 07-13. Projektbericht V1. BFW, Innsbruck; 2014. Available from: <https://gruenerbericht.at/cm4/jdownload/download/28-studien/1644-78-schutzwaldkulisse>

Perzl, F. / Rössel, M. / Markart, G. / Nagl, F. / Lechner, V.: Erhebung terrestrischer Kontroll- und Referenzstichproben der Waldstruktur zur Ableitung der Größe von Vegetationsparametern hydrologischer Modelle. Aufnahmeschlüssel V2-1 2018-08-17. BFW, Innsbruck. Unveröffentlicht, 2018.

Perzl, F. / Rössel, M. / Plörer, M. / Giunta, A. / Adams, M.: Anleitung für die Aufnahme von terrestrischen Kontroll- und Referenzstichproben der Waldstruktur. 2023 V3-1.

Perzl, F. / Rössel, M.: Kap. 6: BLOESSEN Dokumentation - Methoden: Erhebung der Waldvegetation, 2018.

Perzl, F. / Teich, M.: Geodata requirements for mapping protective functions and effects of forests. In: Teich, M., Accastello, C., Perzl, F., Kleemayr, K., editors. Protective forests as Ecosystem-based solution for Disaster Risk Reduction (ECO-DRR). London: IntechOpen, 2021.

Peterson, B. / Dubayah, R. / Hyde, P. / Hofton, M. / Blair, J.B. / Fites-Kaufman, J.: Use of LIDAR for forest inventory and forest management application. In: McRoberts, Ronald E.; Reams, Gregory A.; Van Deusen, Paul C.; McWilliams, William H., eds. Proceedings of the seventh annual forest inventory and analysis symposium; October 3-6, 2005; Portland, ME. Gen. Tech. Rep. WO-77. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service: 193-202. 77, 2007.

Pietsch, S.A. / Hasenauer, H. / Thornton, P.E.: BGC-model parameters for tree species growing in central European forests. Forest Ecology and Management 211, 264–295, 2005.

Puliti, S. / Pearse, G.D. / Watt M.S. / Mitchard, E. / McNicol, I. / Bremer, M. / Rutzinger, M. / Surovy, P. / Wallace, L. / Hollaus, M. / Astrup, R.: A new drone laser scanning

benchmark dataset for characterization of single-tree and forest biophysical properties, in: 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS. Presented at the IGARSS 2021 - 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE, Brussels, Belgium, pp. 728–730, 2021.

Putman, R. J. / Apollonio, M. / Andersen, R.: Ungulate Management in Europe: Problems and Practices. Cambridge University Press, 2011.

QGIS Development Team: QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org/> (26.9.2023), 2025.

Ramalho de Oliveira, L. F. / Lassiter, H. A. / Wilkinson, B. / Whitley, T. / Ifju, P. / Logan, S. R. / Peter, G.F. / Vogel, J.G. / Martin, T. A.: Moving to automated tree inventory: Comparison of UAS-derived lidar and photogrammetric data with manual ground estimates. Remote Sensing, 13(1), 72, 2020.

R Core Team: R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/> (26.9.2023), 2021.

Rich, P.M.: Characterizing plant canopies with hemispherical photographs. Instrumentation for studying vegetation canopies for remote sensing in optical and thermal infrared regions. remote Sens. rev. 5: 13-29, 1990.

Rickenmann, D. / Recking, A.: Evaluation of flow resistance in gravel-bed rivers through a large field data set. Water Resources Research, 47(7), Artikel 2010WR009793, 2011. <https://doi.org/10.1029/2010WR009793>

Rickenmann, D.: Fliessgeschwindigkeit in Wildbächen und Gebirgsflüssen. Wasser, Energie, Luft, 88(11-12), 298–304, 1996.

Rieg, L. / Wichmann, V. / Rutzinger, M. / Sailer, R. / Geist, T. / Stötter, J.: Data infrastructure for multitemporal airborne LiDAR point cloud analysis—Examples from physical geography in high mountain environments. Computers, Environment and Urban Systems, 45, 137-146, 2014.

Riegl: Datenblatt RIEGL VUX- -1LR;

<https://www.geotecnologias.com/content/dam/distributor-share/geotecnologias-com/riegl/hojas-de-datos/riegl-vp-1.pdf>, 2020. (letzter Zugriff am 23.07.2025)

Riegl: Datenblatt RIEGL VUX-SYS – RiCOPTER & VUX-1LR²²;

http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/RIEGL_VUX-SYS_Datasheet_2022-09-27_02.pdf, 2022. (letzter Zugriff am 23.07.2025)

Riegl: Website der Firma RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, Hersteller der für die Befliegungen im MEZG-Rindbach verwendeten ULS-Plattform und -Sensorik;

www.riegl.com, 2025. (letzter Zugriff am 23.07.2025)

Riegler, M.: Zustandserhebung bei Forststraßen. Masterarbeit. Institut für Forsttechnik, Universität für Bodenkultur Wien, 2019.

Rogers, S.R. / Manning, I. / Livingstone, W.: Comparing the spatial accuracy of digital surface models from four unoccupied aerial systems: photogrammetry versus LiDAR. Remote Sensing 12, 1–17, 2020.

Rooney, T. P. / Waller, D. M.: Direct and indirect effects of white-tailed deer in forest ecosystems. Forest Ecology and Management, 181(1-2), 165-176, 2003.

Roxburgh J.R. / Kelly D.: Uses and limitations of hemispherical photography for estimating forest light environments, N. Z. J. Ecol. 19, 213–217, 1995.

Russell, M. B. /Fraver, S. / Aakala, T. / Gove, J. H. / Woodall, C. W. / D’Amato, A. W. / Ducey, M. J.: Quantifying carbon stores and decomposition in dead wood: A review. Forest Ecology and Management 350:107–128, 2015.

Schönauer, M. /Holzleitner, F. / Pszeny, D. / Kikulski, J. / Erber, G. / Jaeger, D. / Riegler, M. / Hoffmann, S.: Indicator-Based Assessment of Trafficability of Forest Roads in Europe, in Proceedings of the 52nd International Symposium on Forestry Mechanization. Exceeding the Vision: Forest Mechanisation of the Future, Sopron, Hungary/Forchtenstein, Austria.2019.

Schönenberger, W. / Noack, A. / Thee, P.: Effect of timber removal from windthrow slopes on the risk of snow avalanches and rockfall. *For. Ecol. Manag.* (213) 197-208, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.03.062>

Shao, J. Yao W. Wan P. Luo L. Wang P. Yang L. Lyu J. / Zhang, W.: Efficient co-registration of UAV and ground LiDAR forest point clouds based on canopy shapes. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 114, 1–11, 2022.

Sigloch, H.: Technische Fluidmechanik. SpringerLink Bücher. Springer Berlin Heidelberg, 2012. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-22845-2>

Smart, G. M. / Jäggi, M.: Sedimenttransport in steilen Gerinnen = Sediment transport on steep slopes. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich Nr. 64. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, 1983.

Speed, J. D. / Austrheim, G. / Hester, A. J. / Mysterud, A.: Elevational advance of alpine plant communities is buffered by herbivory. *Journal of Vegetation Science*, 25(3), 724-733, 2014.

Starsich, A. / Perzl, F.: Die österreichische Hinweiskarte Schutzwald – Geodatenmanagement für die Ingenieurpraxis. Wildbach- und Lawinenverbau – Aus der Praxis, für die Praxis, 86(189), 2022. ISBN 978-3-9504924-3-9

Storaunet, K. O. / Rolstad, J.: Mengde og utvikling av død ved i produktiv skog i Norge. Med basisi data fra Landsskogtakseringens 7.(1994-1998) og 10. takst (2010-2013). Oppdragsrapport fra Skog og landskap, 2015.

Strahler, A.N.: Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks, in: Chow, V.T. (Ed.), *Handbook of Applied Hydrology*. McGraw-Hill, New York, pp. 4-39/4-76, 1964.

Strickler, A.: Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauheitszahlen für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen. Mitt. Amt für Wasserwirtschaft (Nr. 16), 1923.

Swayze, N.C. / Tinkham, W.T. / Creasy, M.B. / Vogeler, J.C. / Hoffman, C.M. / Hudak, A.T.: Influence of UAS flight altitude and speed on aboveground biomass prediction. *Remote Sensing* 14, 1–16, 2022.

Sykes, J. / Toft, H. / Haegeli, P. / Statham, G.: Automated avalanche terrain exposure scale (ATES) mapping – local validation and optimization in western Canada. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 24, 947–971, 2024. <https://doi.org/10.5194/nhess-24-947-2024>

Thornton, P.E.: Description of a numerical simulation model for predicting the dynamics of energy, water, carbon, and nitrogen in a terrestrial ecosystem. Ph.D. thesis, University of Montana, Missoula, 1998.

Teich, M. / Giunta, A.D. / Hagenmuller, P. / Bebi, P. / Schneebeili, M. / Jenkins, M.J.: Effects of bark beetle attacks on forest snowpack and avalanche formation – Implications for protection forest management. *For. Ecol. and Manag.* 438, 186-203, 2019.

Toft, B. / Müller, K. / Hendriks, J. / Jaedicke, C. / Bühler, Y.: Can big data and random forests improve avalanche runout estimation compared to simple linear regression? *Cold Regions Science and Technology*, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2023.103844>

Toft, H. / Sykes, J. / Schauer, A. / Hendriks, J. / Hetland, A.: AutoATES v2.0: Automated avalanche terrain exposure scale mapping. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 24, 1779–1793, 2024. <https://doi.org/10.5194/nhess-24-1779-2024>

Tollinger, M. / Granig, A. / Jenner, A. / Oesterle, F. / Siegele, P. / Hochreiter, H.: Praxisleitfaden für Lawinsimulationen in der WLV (v1.4). Wildbach- und Lawinenverbauung – Fachzentrum Geologie und Lawinen (FZGL), Fachbereich Lawinen (FBL), 2023.

Tomljanović, K. / Kolar, A. / Đuka, A. / Franjević, M. / Jurjević, L. / Matak, I. / Ugarković, D. / Balenović, I.: Application of UAS for Monitoring of Forest Ecosystems—A Review of Experience and Knowledge. *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering*, 43(2), 487-504, 2022.

Torresan, C. / Berton, A. / Carotenuto, F. / Di Gennaro, S.F. / Gioli, B. / Matese, A. / Miglietta, F. / Vagnoli, C. / Zaldei, A. / Wallace, L.: Forestry applications of UAVs in Europe: a review. *International Journal of Remote Sensing* 38, 2427–2447, 2017.

Umweltbundesamt GmbH. BORIS—Bodeninformationssystem; Umweltbundesamt GmbH: Dessau-Roslau, Germany, 2023.

USACE Hydrologic Engineering Center: HEC-HMS Users Manual, 2025.
<https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmsum/4.8/geographic-information/basin-characteristics>.

Veitinger, J. / Purves, R.S. / Sovilla, B.: Potential slab avalanche release area identification from estimated winter terrain: a multi-scale, fuzzy logic approach. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 16, 2211–2225, 2016.

Verhoeven / G.: Taking computer vision aloft – archaeological three-dimensional reconstructions from aerial photographs with photostan / *Archaeol: Prospect.*, 18, 67–73, 2011.

Verroust, A. / Lazarus, F.: Extracting skeletal curves from 3D scattered data. *Vis. Comput.* 16, 15–25, 2000.

Viglas, J.N. / Brown, C.D. / Johnstone, J.F.: Age and Size Effects on Seed Productivity of Northern Black Spruce. *Can. J. For. Res.* 2013, 43, 534, 2013.

Waddel, K.L.: Sampling coarse woody debris for multiple attributes in extensive resource inventories. *Ecol. Indic.* 1(3), 139–153, 2002. [https://doi.org/10.1016/S1470-160X\(01\)00012-7](https://doi.org/10.1016/S1470-160X(01)00012-7).

Wallace, L. / Lucieer, A. / Watson, C. / Turner, D.: Development of a UAV-LiDAR system with application to forest inventory. *Remote Sensing* 4, 1519–1543, 2012.

Wang, Y. / Pyörälä, J. / Liang, X. / Lehtomäki, M. / Kukko, A. Yu X. / Kaartinen, H. / Hyypä, J.: In situ biomass estimation at tree and plot levels: What did data record and what did algorithms derive from terrestrial and aerial point clouds in boreal forest. *Remote Sensing of Environment* 232, 111309, 2019.

White, J. C. / Coops, N. C. / Wulder, M. A. / Vastaranta, M. / Hilker, T. / Tompalski, P.: Remote sensing technologies for enhancing forest inventories: A review. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 42(5), 619-641, 2016.

Wieser, M. / Hollaus, M. / Mandlbürger, G. / Glira, P. / Pfeifer, N.: ULS lidar supported analyses of laser beam penetration from different ALS systems into vegetation. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* III-3, 233–239, 2016.

Wieser, M. / Mandlbürger, G. / Hollaus, M. / Otepka, J. / Glira, P. / Pfeifer, N.: A case study of UAS borne laser scanning for measurement of tree stem diameter. *Remote Sensing* 9, 1–11, 2017.

Wieshammer, S. (2025 – in Vorbereitung):

Woon, H.T. / O'Hara, K.L.: Height: diameter ratios and stability relationships for four northern Rocky Mountain tree species. *West. J. Appl. For.* 16(2), 87-94, 2001.
<https://doi.org/10.1093/wjaf/16.2.87>

Wulder, M. A. / Franklin, S. E. (Eds.): Remote sensing of forest environments: concepts and case studies. Springer Science & Business Media, 2012.

Xiang, B. / Wielgosz, M. / Kontogianni, T. / Peters, T. / Puliti, S. / Astrup, R. / Schindler, K.: Automated forest inventory: Analysis of high-density airborne LiDAR point clouds with 3D deep learning. *Remote Sensing of Environment* 305, 1–20, 2024.

Zhu, J.J. / Matsuzaki, T. / Lee, F.Q. / Gonda, Y.: Effect of gap size created by thinning on seedling emergency, survival and establishment in a coastal pine forest. *For. Ecol. Manage.* 182, 339–354, 2003.

Normen

ÖNORM EN 16173 – Schlamm behandelter Bioabfall und Boden – Aufschluss von mit Salpetersäure löslichen Anteil von Elementen. Ausgabe 2012.11

ÖNORM EN ISO 11272 - Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der Trockenrohdichte. Ausgabe 2017.07

ÖNORM L 1061-2 - Physikalische Bodenuntersuchungen – Bestimmung der Korngrößenverteilung des Mineralbodens. Teil 2: Feinboden. Ausgabe 2002.02

ÖNORM L 1062 – Physikalische Bodenuntersuchungen – Bestimmung des Wassergehaltes und des Wasseranteils. Ausgabe 2003.01

ÖNORM L 1080 – Chemische Bodenuntersuchungen – Bestimmung des organischen Kohlenstoffs durch trockene Verbrennung. Ausgabe 1999.04

ÖNORM L 1083 – Chemische Bodenuntersuchungen – Bestimmung der Acidität (pH-Wert). Ausgabe 2006.04

ÖNORM L 1084 – Chemische Bodenuntersuchungen – Bestimmung von Carbonat. Ausgabe 2006.04

ÖNORM L 1086-1 - Chemische Bodenuntersuchungen - Extraktion der effektiv austauschbaren Kationen Ca^{++} , K^{+} , Mg^{++} , Na^{+} sowie Al^{+++} , Fe^{+++} , Mn^{++} und H^{+} mit Bariumchlorid-Lösung und Ermittlung der Austauschkapazität. Ausgabe 2014.03

ÖNORM L 1095 – Chemische Bodenuntersuchungen – Bestimmung des Gesamtstickstoffgehaltes durch trockene Verbrennung. Ausgabe 2002.04

AP 1 – Projektmanagement

Abbildung 187 Die wichtigsten Ergebnisse und Stichworte des Fachaustausches
Schutzwald als Mindmap (Original unter: zenodo.org/mindmap)

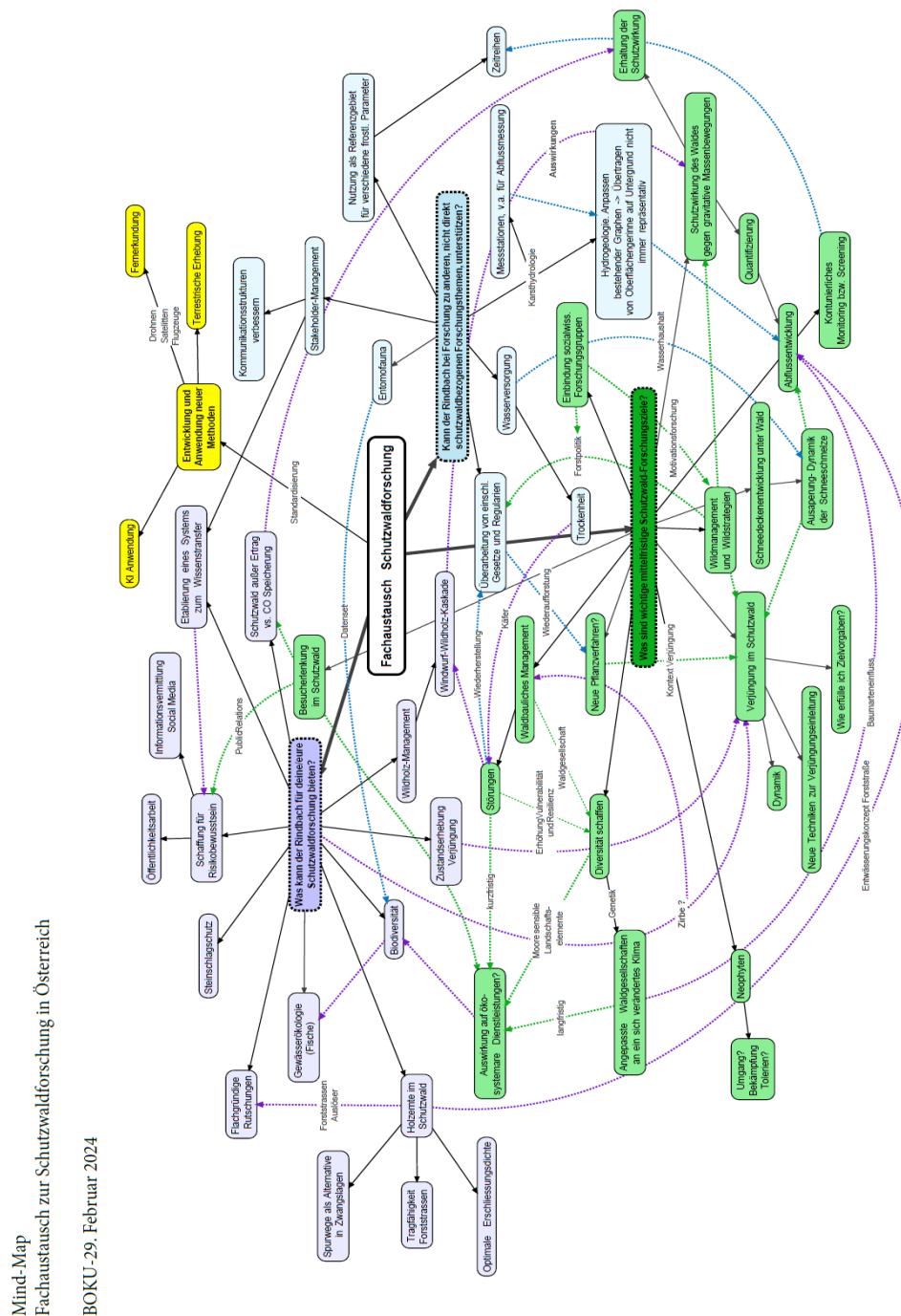


Abbildung 188 Poster über das Mustereinzugsgebiet Rindbach für die Lange Nacht der Forschung (Original unter: zenodo.org/LangeNachtderForschung_Poster)



Abbildung 189 Allgemeines Poster bezüglich des Modelleinzugsgebiet Rindbach (Original unter: zenodo.org/Poster)



AP 2 – Datenmanagement

Kurzanleitung Daten-Upload via Zenodo im Kontext des Waldfondsprojektes MEZG-Rindbach

Daten auf Zenodo in die Community „Model Catchment Rindbach“ hochladen
<https://zenodo.org/communities/mezg-rindbach/>

7. Zenodo-Konto erstellen oder anmelden

- Besucht die Website von Zenodo: <https://zenodo.org/>.
- Falls Ihr noch kein Konto habt:
- Klickt oben rechts auf Sign up.
- Alternativ könnt ihr euch mit einem bestehenden GitHub - oder ORCID-Konto anmelden.
- Falls Ihr bereits ein Konto habt:
- Klickt oben rechts auf Log in und meldet euch mit euren Zugangsdaten an.

8. Vorbereitung der Daten

Bevor Ihr eure Daten hochladet, solltet Ihr sicherstellen, dass sie gut organisiert und dokumentiert sind. Hier sind einige wichtige Punkte:

- a) Datenformat: Datensets, Abbildungen, Poster, Präsentationen, Publikationen, Videos/Audios,...

Speichert die Daten in einem gängigen und leicht zugänglichen Format, z. B.:

- Tabellen: CSV, Excel (.xlsx)
- Textdateien: TXT, JSON, XML
- Geodaten: GeoTIFF, Shapefiles KEINE Geodatabases!
- Bilder: PNG, JPEG,...
- Dokumentationen: PDF, Markdown (.md)
- Falls eure Daten aus mehreren thematisch zusammenhängende Dateien bestehen, könnt ihr sie in einer ZIP- oder TAR-Datei bündeln.

- b) Dokumentation: Sollte euer Datensatz komplex sein und Informationen welche nicht durch das Metadatenformular von Zenodo abgedeckt ist (Punkt 4) benötigen, dann erstellt bitte eine README-Datei (z. B. README.txt oder README.md), die z.B.: folgende zusätzliche Informationen enthalten kann:
- Wenn euer Datensatz aus mehreren Dateien oder Ordnern besteht, könnt ihr in der README-Datei die Struktur und den Inhalt der Dateien beschreiben. Beispiel: "Die Datei daten.csv enthält die Rohdaten, während die Datei metadaten.txt (json,...) die zugehörigen Metadaten beschreibt."
 - Hinweise zur Nutzung der Daten, z. B. Softwareanforderungen, Formatbeschreibungen oder bekannte Einschränkungen. Beispiel: "Die Daten wurden mit der Software XYZ Version 1.2.3 erstellt. Zur Analyse wird die Installation dieser Software empfohlen."
 - ...

Die Readme Datei bitte zusammen mit dem eigentlichen Datensatz hochladen.

c) Lizenzen

- Überlegt euch , welche Lizenz ihr für eure Daten verwenden möchtet. Zenodo bietet verschiedene Optionen, z. B.:
- CC-BY 4.0: Erlaubt die Nutzung und Weiterverbreitung, solange die Urheber genannt werden.
- CC0: Verzicht auf alle Urheberrechte (Public Domain).

9. Daten hochladen

a) Startet den Upload-Prozess:

- Meldet euch bei Zenodo an.
- Klickt oben oben rechts auf Upload.

b) Community auswählen

- Ganz oben erscheint ein Header mit der Frage: Community auswählen.
- Gebt in das Suchfeld „Model Catchment Rindbach“ ein.
- Wählt die Community „Model Catchment Rindbach“ aus, damit euer Datensatz dieser Community zugeordnet wird.

c) Dateien hochladen:

- Zieht eure Dateien in das Upload-Feld oder klickt auf Choose Files, um die Dateien manuell auszuwählen.
 - Falls eure Daten aus mehreren Dateien bestehen, ladet eine ZIP-Datei hoch.
- Andere Lizenzen: Je nach Bedarf.

10. Metadaten ausfüllen

Nachdem Ihr die Dateien hochgeladen habt, müsst ihr die Metadaten ausfüllen. Diese beschreiben euren Datensatz und machen ihn auffindbar. Hier ein paar wichtige Hinweise:

a) Titel

- Gebt einen aussagekräftigen Titel für euren Datensatz ein, z. B.:
- „Waldfondsprojekt MEZG-Rindbach: Bodendaten 2023“

b) Beschreibung

- Beschreibt den Inhalt und Zweck der Daten. Beispiel:
- "Dieser Datensatz enthält Bodendaten, die im Rahmen des Waldfondsprojekts MEZG- Rindbach im Jahr 2023 erhoben wurden. Die Daten umfassen Informationen zu Bodentyp, Bodenbeschaffenheit (Bodenart,...) und allgemeine Standortbedingungen."

c) Autoren

Autoren werden in der akademischen Zitation aufgeführt. Die Rollen können sein:

Annotator, Kontaktperson, Datensammler, Datenkurator, Datenverwalter, Verteiler, Herausgeber, gastgebende Einrichtung, Produzent, Projektleiter, Projektmanager, Registrierungsagentur, Registrierungsbehörde, verwandte Person, Forschungsgruppe, Forscher, Sponsor, Betreuer, Arbeitspaketleiter

- Fügt alle Mitwirkenden hinzu, die an der Erstellung der Daten beteiligt waren.
- Gebt Vor- und Nachnamen sowie ggf. die ORCID-ID der Autoren an.

d) Datum der Veröffentlichung

- Gebt das Datum an, an dem die Daten veröffentlicht werden sollen. Standardmäßig wird das aktuelle Datum verwendet.

e) Lizenz

- Wählt eine passende Lizenz aus (siehe Schritt 2c).

f) Zusätzliche Felder

- Keywords: Gebt Stichwörter ein, die euren Datensatz beschreiben (z. B. "Wald", "Vegetation", "Klimadaten").
- Referenzen: Falls eurer Datensatz mit einer Publikation verknüpft ist, könnt ihr hier den DOI der Publikation angeben.

g) Funding:

- Information über die Community bereits gegeben.
- Zusätzliche oder andere Förderungen hier angeben!

11. Veröffentlichen

- Überprüft alle Angaben sorgfältig.
- Klickt auf Publish (Veröffentlichen), um die Daten hochzuladen.
- Hinweis: Nach der Veröffentlichung erhalten eure Daten einen DOI (Digital Object Identifier), der sie eindeutig identifiziert und zitierbar macht. Ich muss momentan jeden Datensatz vor Publikation freigeben!

12. Sichtbarkeit und Verwaltung

- Eure Daten sind nun in der Community „Model Catchment Rindbach“ sichtbar.
- Ihr könnt den generierten DOI verwenden, um auf eure Daten zu verweisen (z. B. in Berichten, Publikationen oder Präsentationen).
- Falls Ihr Änderungen vornehmen müssen, können Ihr den Datensatz bearbeiten oder eine neue Version hochladen.

Wichtige Hinweise

- Datenqualität: Achtet darauf, dass eure Daten vollständig und korrekt sind. Fehlerhafte oder unvollständige Daten können die Wiederverwendbarkeit beeinträchtigen.
- Rechte und Datenschutz: Stellt sicher, dass Ihr die Rechte an den hochgeladenen Daten besitzen und keine sensiblen oder personenbezogenen Daten veröffentlicht.
- **Sobald die Daten publiziert sind kann man sie nicht mehr ändern (nur Versionen einführen!).**

AP 7 – Naturgefahren

AP 7.1 Lawinen

Abbildung 190 Schematische Darstellung der Arbeitsschritte für die Berechnung dendrometrischer Parameter aus ULS-Daten mittels einem *top-down* Verfahren

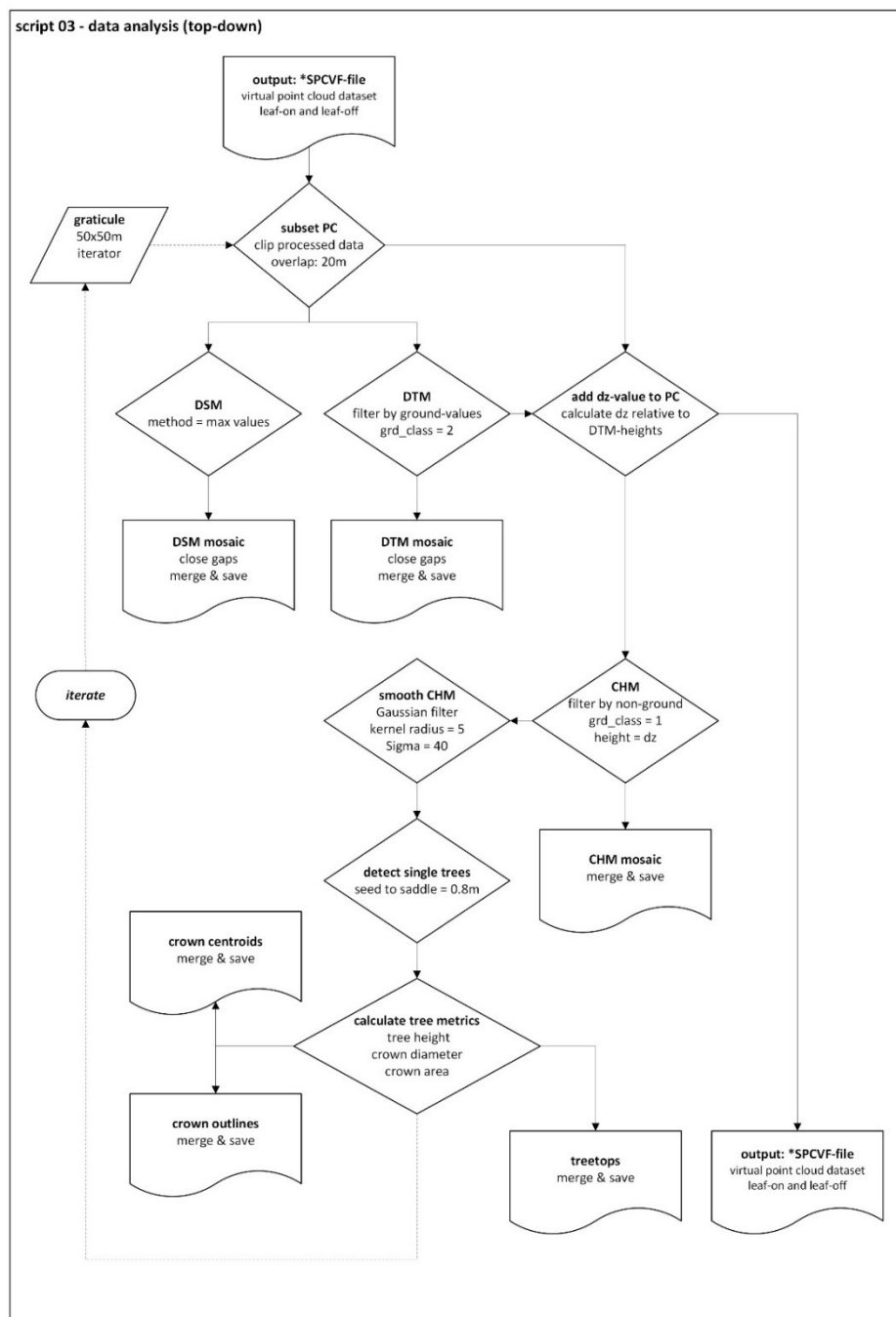


Abbildung 191 Schematische Darstellung der Arbeitsschritte für die Berechnung

dendrometrischer Parameter aus ULS-Daten mittels einem *bottom-up* Verfahren – Teil A

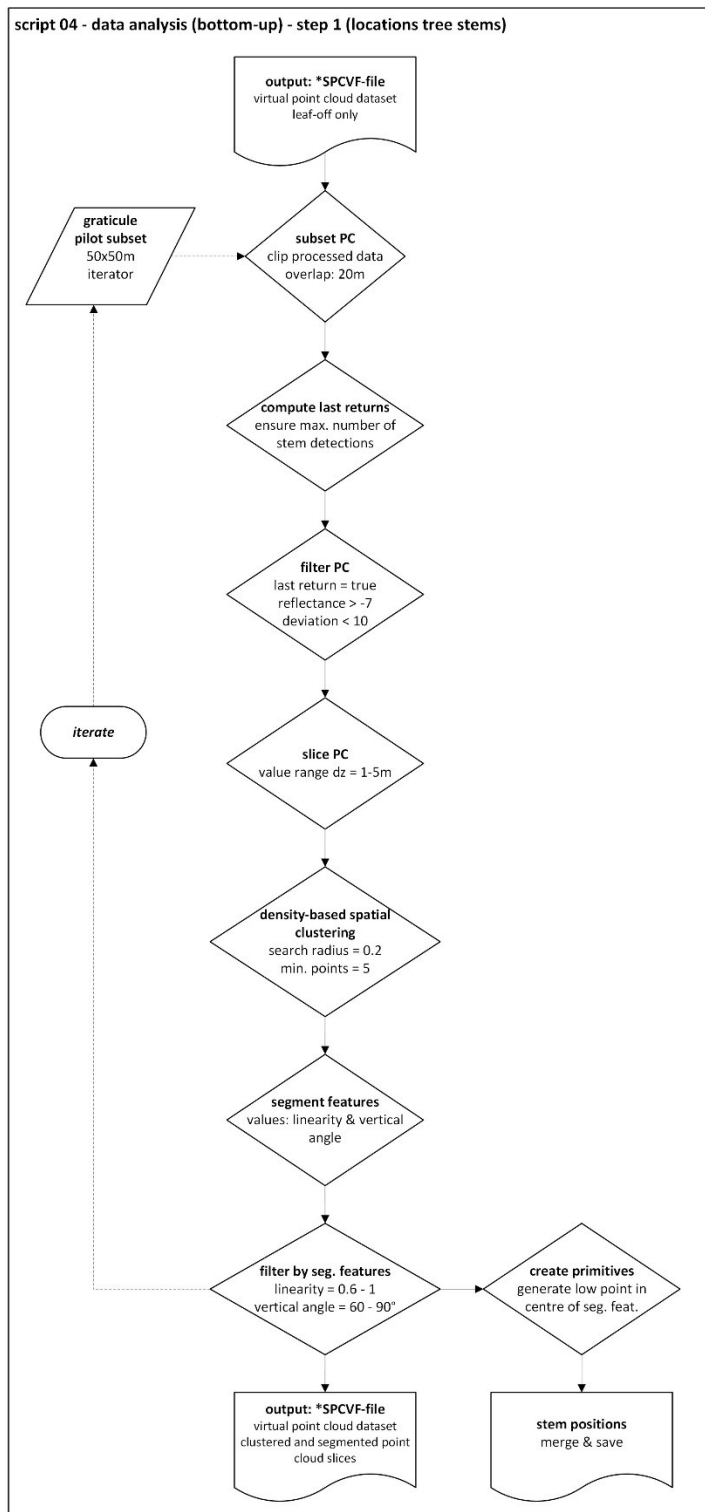


Abbildung 192 Schematische Darstellung der Arbeitsschritte für die Berechnung dendrometrischer Parameter aus ULS-Daten mittels einem *bottom-up* Verfahren – Teil B

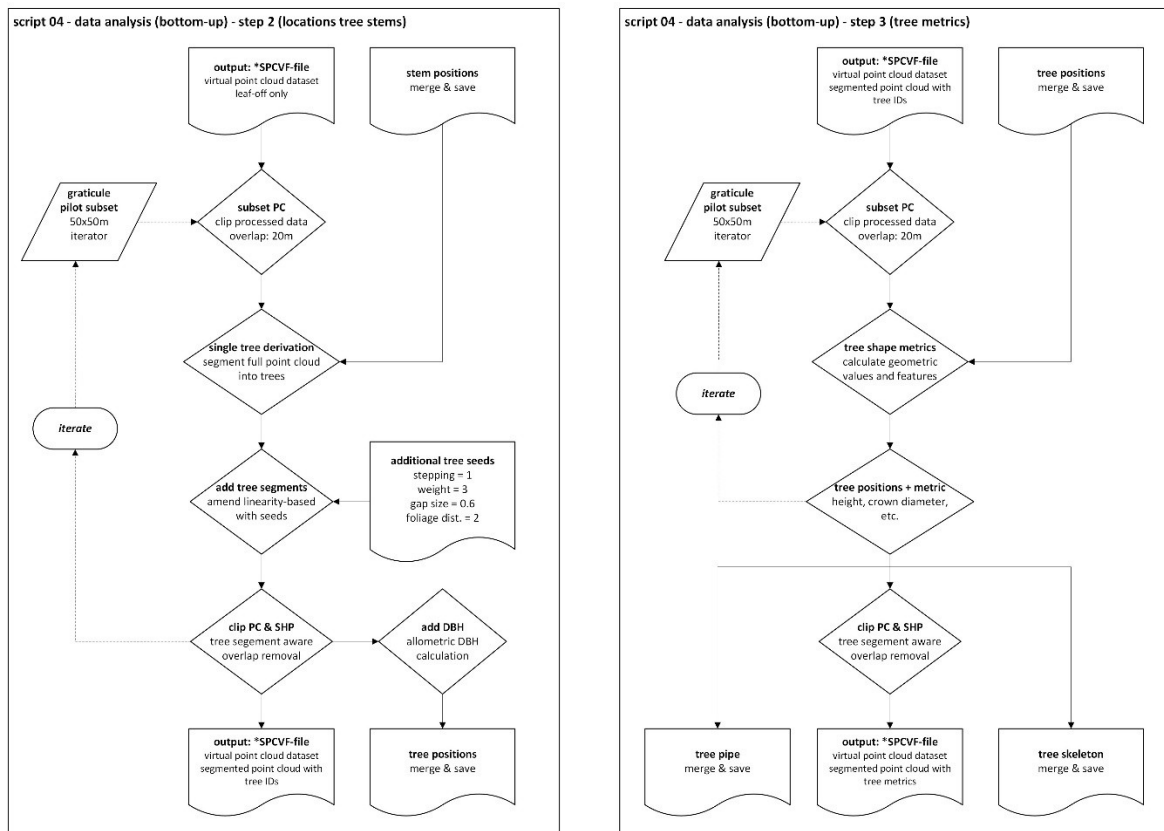


Abbildung 193 PRAs (blau) modelliert mit Variante A (Gutachterlich). Flächenanteil potenzieller Anbruchpixel an der Gesamtfläche des MEZG-Rindbach: 7,85 %

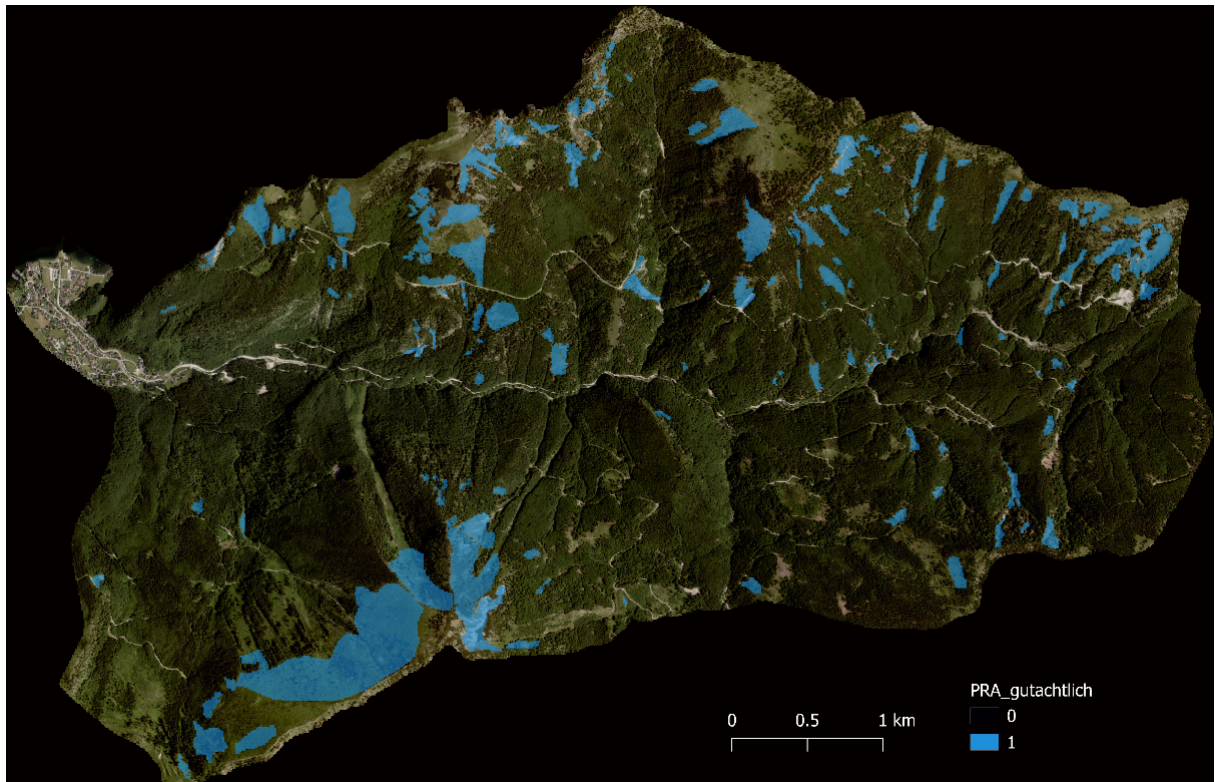


Abbildung 194 PRAs (blau) modelliert mit Variante B-1 (Basierend auf dem Projekt „GRAVIPROFOR“ - Dispositionsklasse 3). Flächenanteil potenzieller Anbruchpixel an der Gesamtfläche des MEZG-Rindbach: 3,76 %

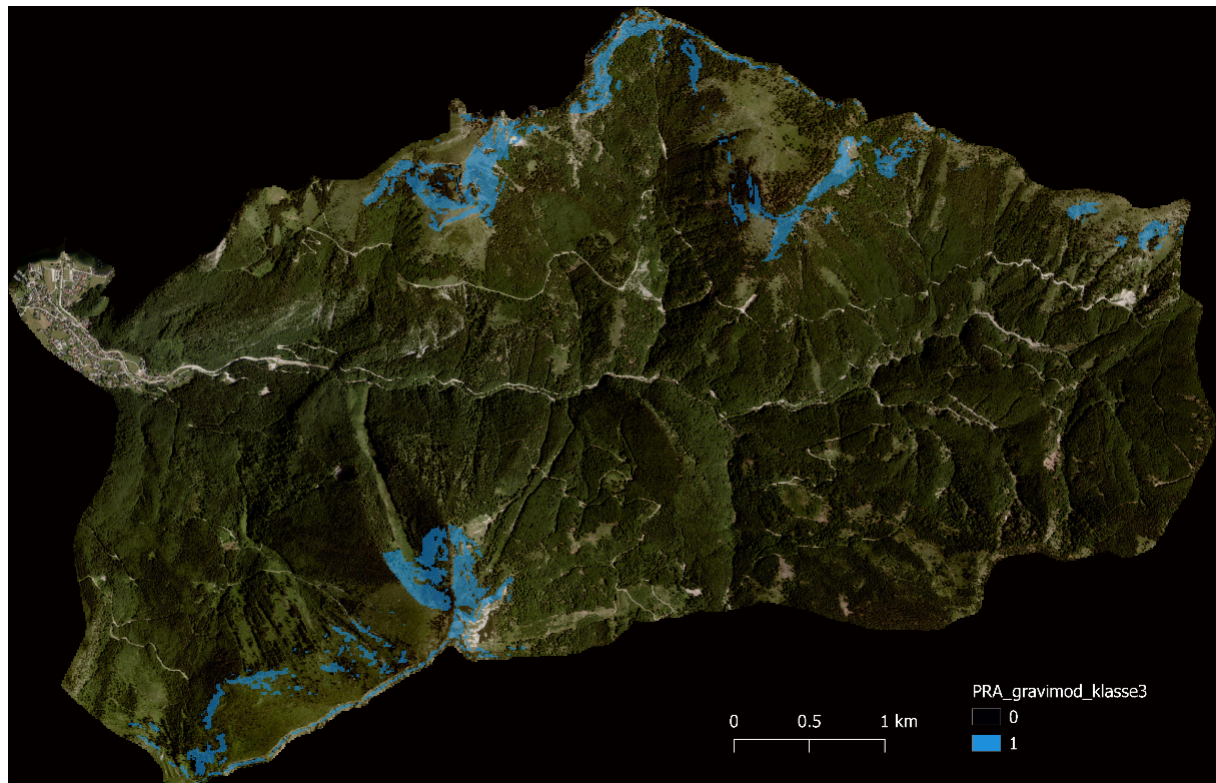


Abbildung 195 PRAs (blau) modelliert mit Variante B-2 (Basierend auf dem Projekt „GRAVIPROFOR“ - Dispositionsklassen 3 und 2). Flächenanteil potenzieller Anbruchpixel an der Gesamtfläche des MEZG-Rindbach: 24,35 %

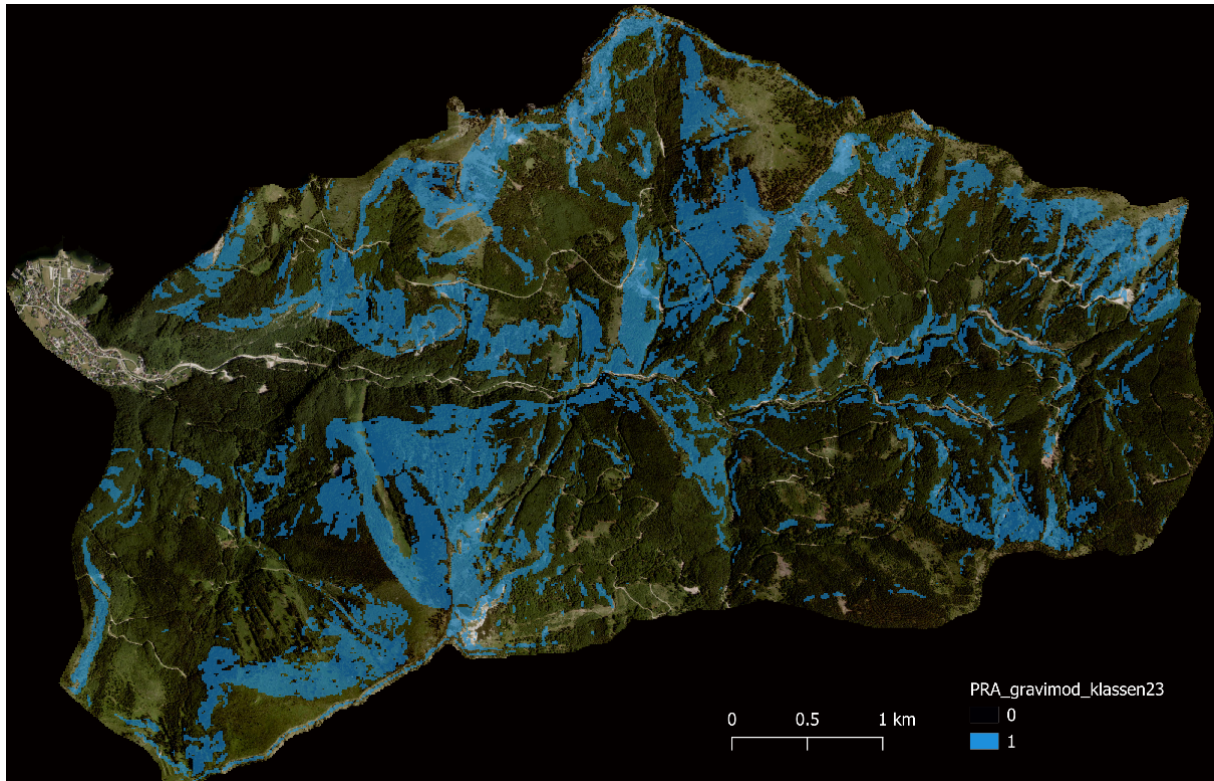


Abbildung 196 PRAs (blau) modelliert mit Variante B-3 (Basierend auf dem Projekt „GRAVIPROFOR“ - Dispositionsklassen 3, 2 und 1). Flächenanteil potenzieller Anbruchpixel an der Gesamtfläche des MEZG-Rindbach: 44,98 %

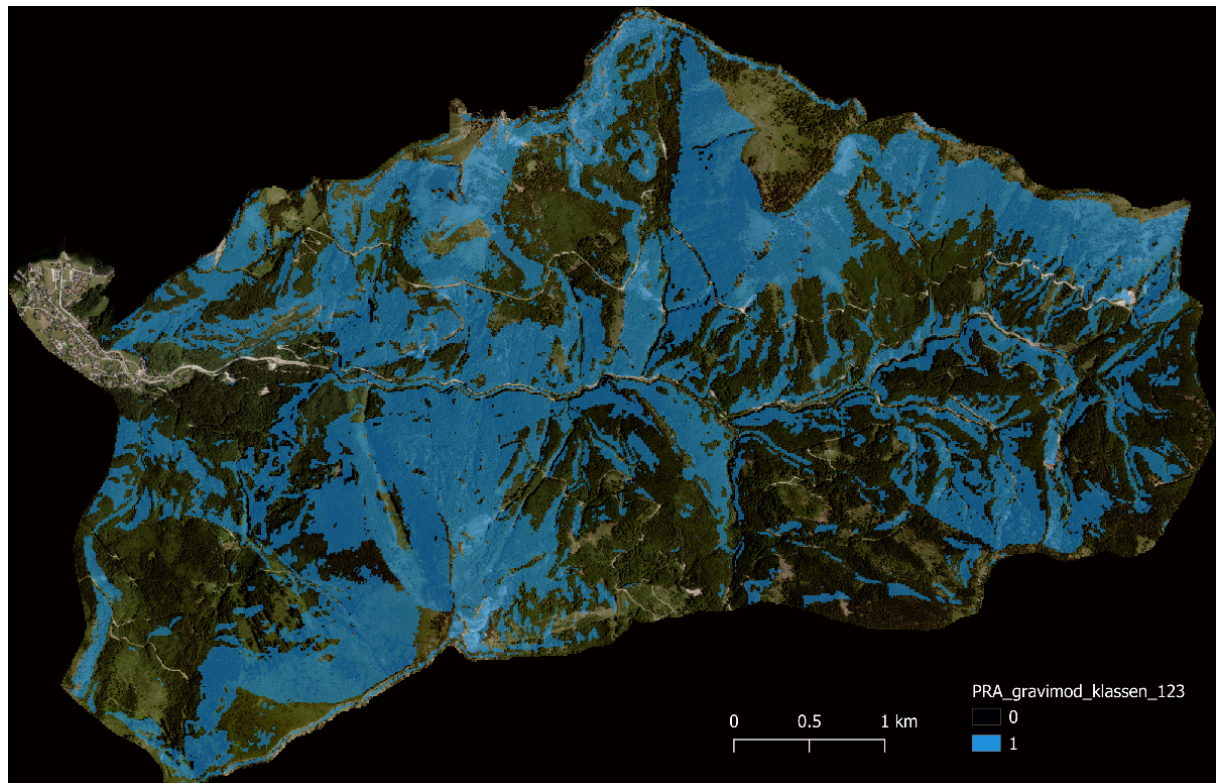


Abbildung 197 PRAs (blau) modelliert mit Variante C-1 (Kombination aus nDOM und Richtwerten aus NaiS; mind. 400 m² Aggregate). Flächenanteil potenzieller Anbruchpixel an der Gesamtfläche des MEZG-Rindbach: 15,03 %

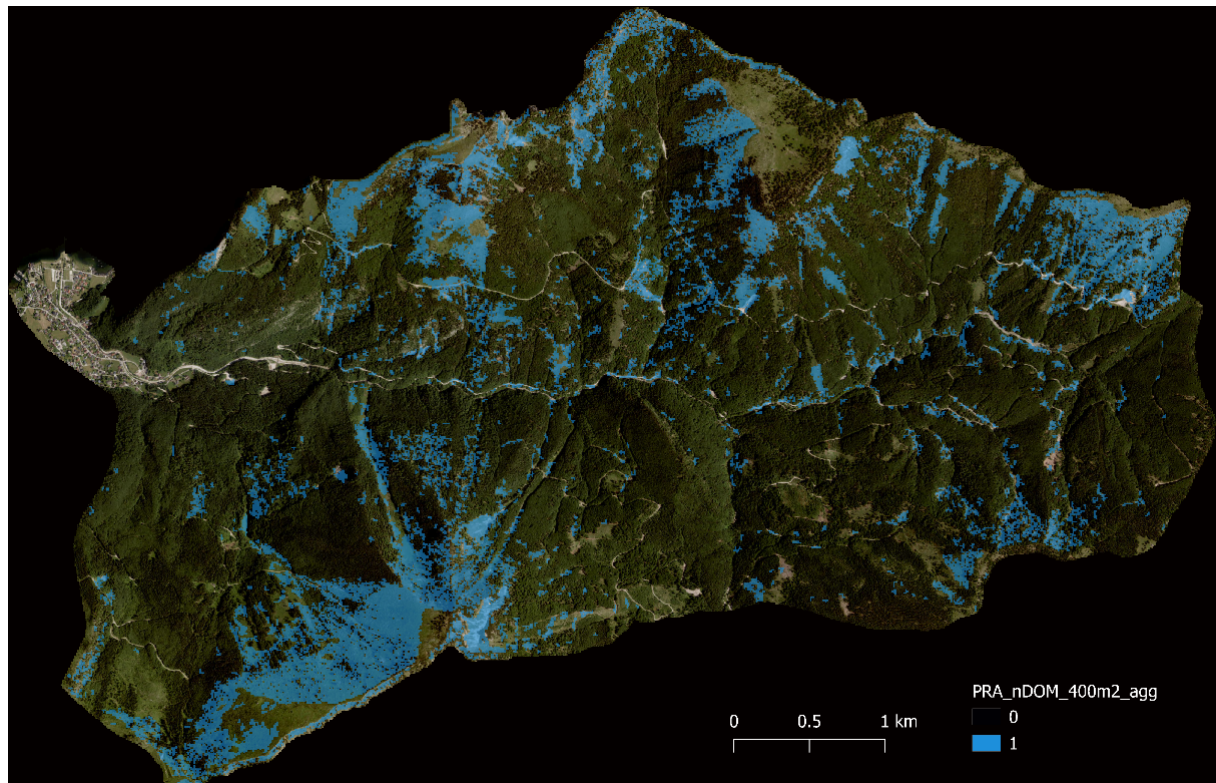


Abbildung 198 PRAs (blau) modelliert mit Variante C-2 (Kombination aus nDOM und Richtwerten aus NaiS; mind. 900 m² Aggregate). Flächenanteil potenzieller Anbruchpixel an der Gesamtfläche des MEZG-Rindbach: 13,31 %

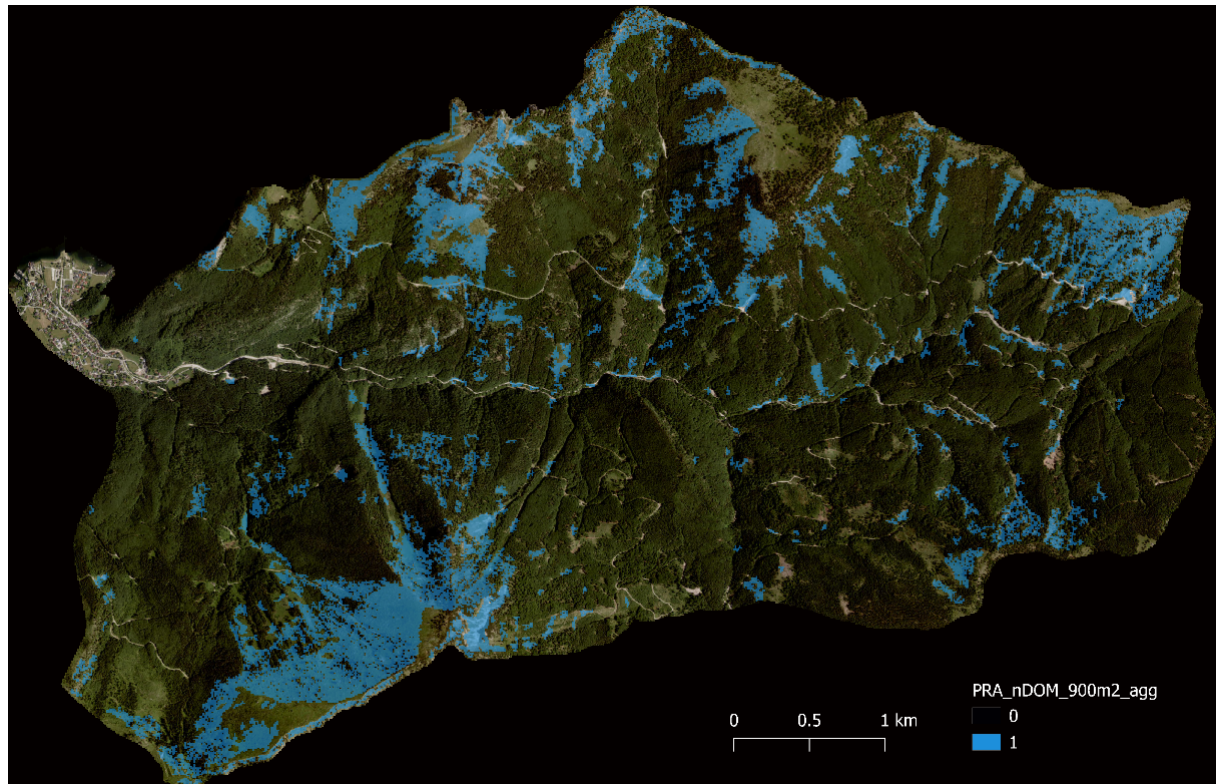


Abbildung 199 com4FlowPy-Simulationsergebnisse für PRA-Szenario D-1 (ohne Waldwirkung) mit der Modellparameter-Kombination Var2-noFor ($\alpha = 26^\circ$; $z_{lim}^\delta = 215$ m;

$R_{stop} = 0,003$). Blau: PRAs; Gelb-Rot: modellierte Prozessfläche und Intensität, dargestellt durch die Energielinienhöhe z^δ

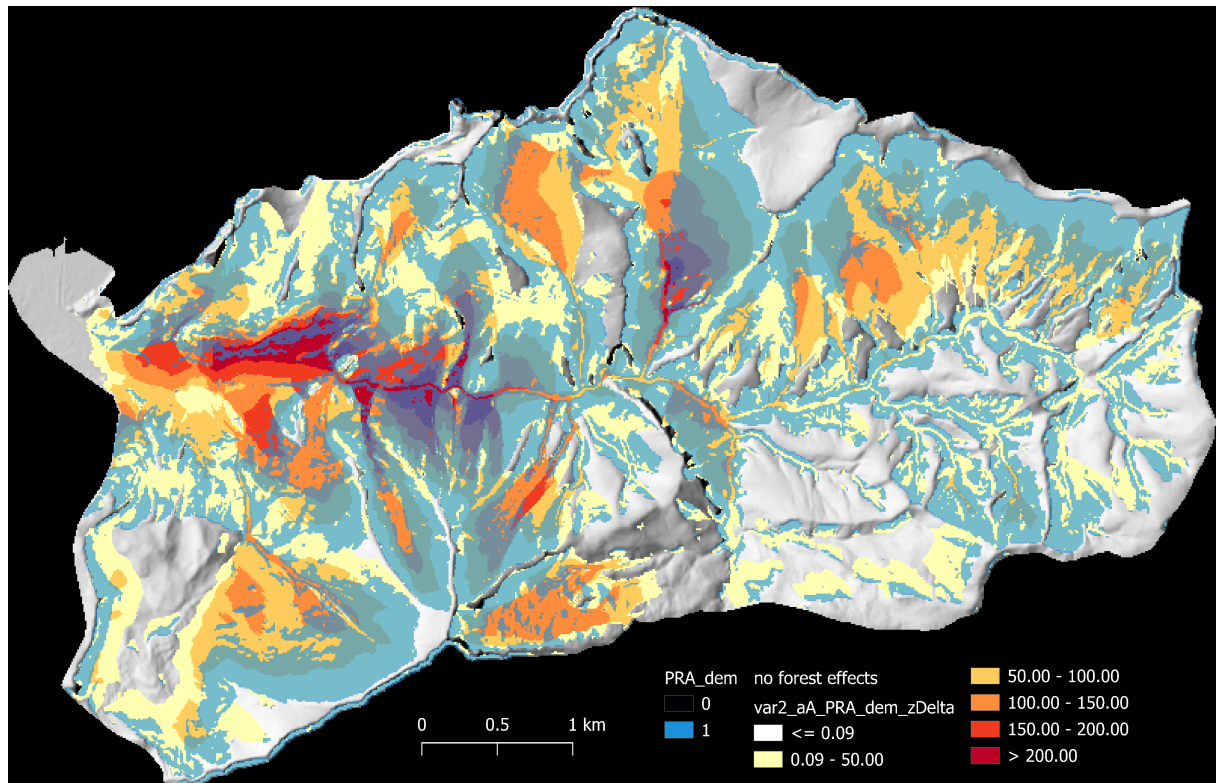


Abbildung 200 com4FlowPy-Simulationsergebnisse für PRA-Szenario D-2 (mit Waldwirkung, P-VHM) mit der Modellparameter-Kombination Var1-withFor ($\alpha = 24^\circ$; z_{lim}^δ)

$= 270 \text{ m}$; $R_{stop} = 0,001$; $\Delta_{for,max}^{\alpha} = 23^{\circ}$). Blau: PRAs; Gelb-Rot: modellierte Prozessfläche und Intensität, dargestellt durch die Energielinienhöhe z^{δ}

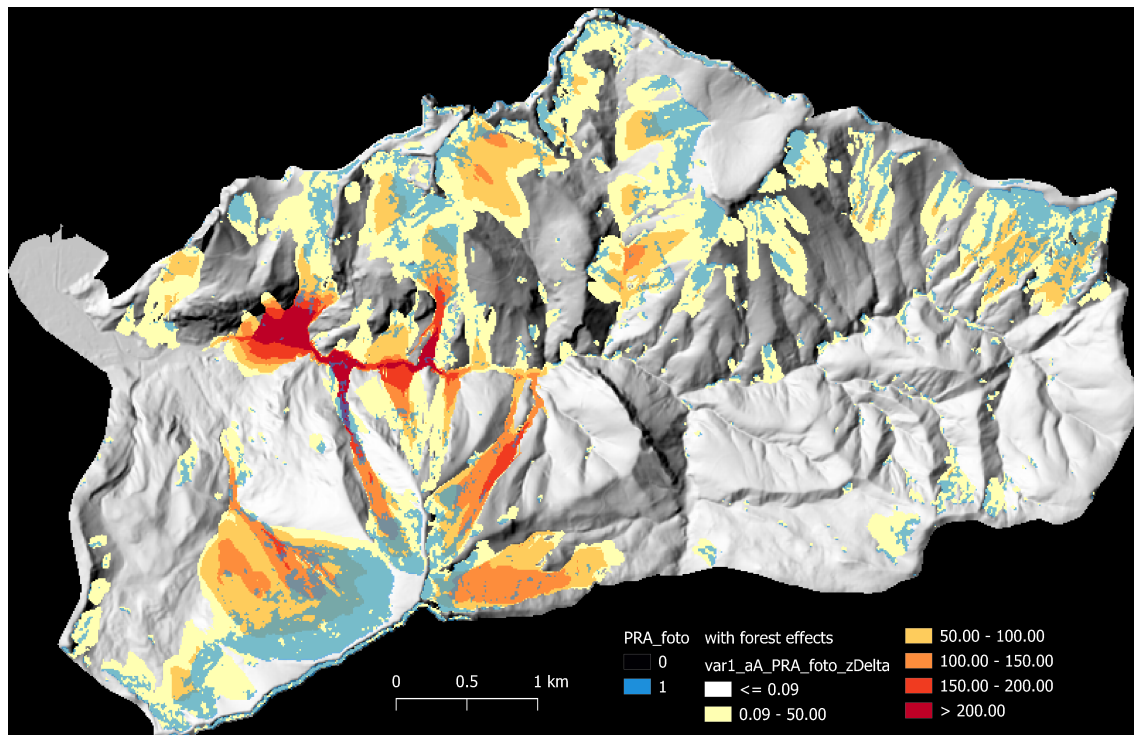


Abbildung 201 com4FlowPy-Simulationsergebnisse für PRA-Szenario D-2 (mit Waldwirkung, P-VHM) mit der Modellparameter-Kombination Var2-withFor ($\alpha = 25^{\circ}$; z_{lim}^{δ}

$= 215 \text{ m}$; $R_{stop} = 0,003$; $\Delta_{for,max}^{\alpha} = 22^{\circ}$). Blau: PRAs; Gelb-Rot: modellierte Prozessfläche und Intensität, dargestellt durch die Energielinienhöhe z^{δ}

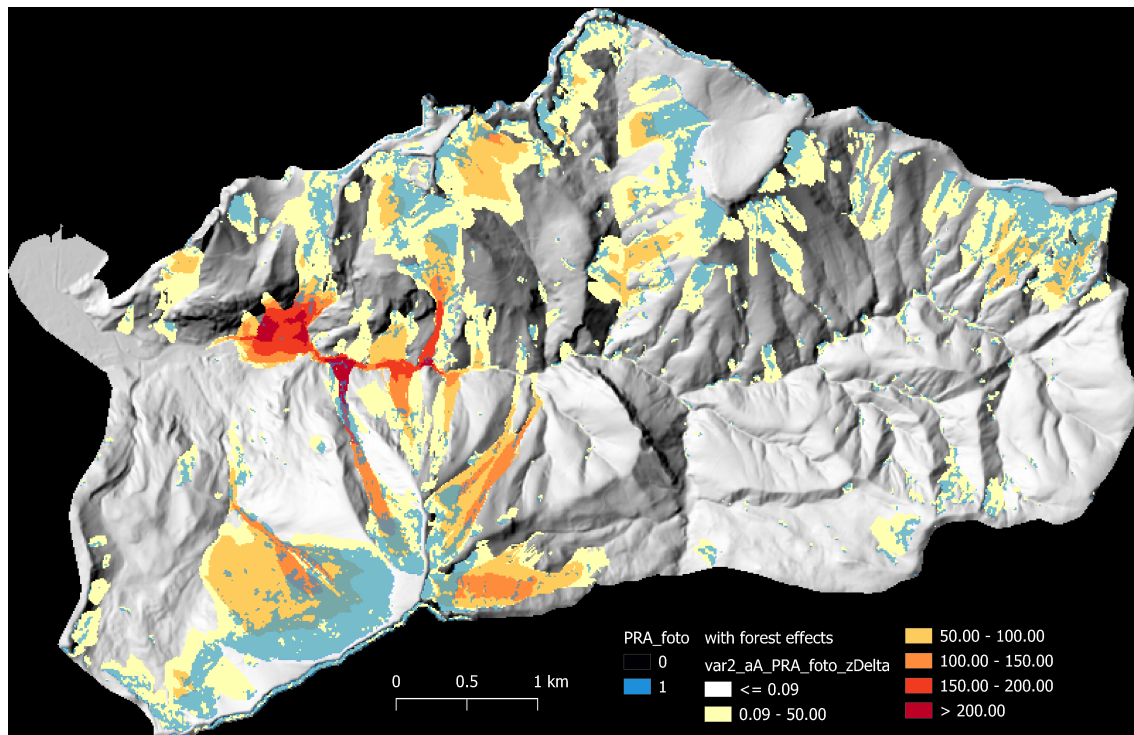


Abbildung 202 com4FlowPy-Simulationsergebnisse für PRA-Szenario D-2 (mit Waldwirkung, P-VHM) mit der Modellparameter-Kombination Var3-withFor ($\alpha = 26^{\circ}$; z_{lim}^{δ}

= 185 m; $R_{stop} = 0,003$; $\Delta_{for,max}^{\alpha} = 21^{\circ}$). Blau: PRAs; Gelb-Rot: modellierte Prozessfläche und Intensität, dargestellt durch die Energielinienhöhe z^{δ}

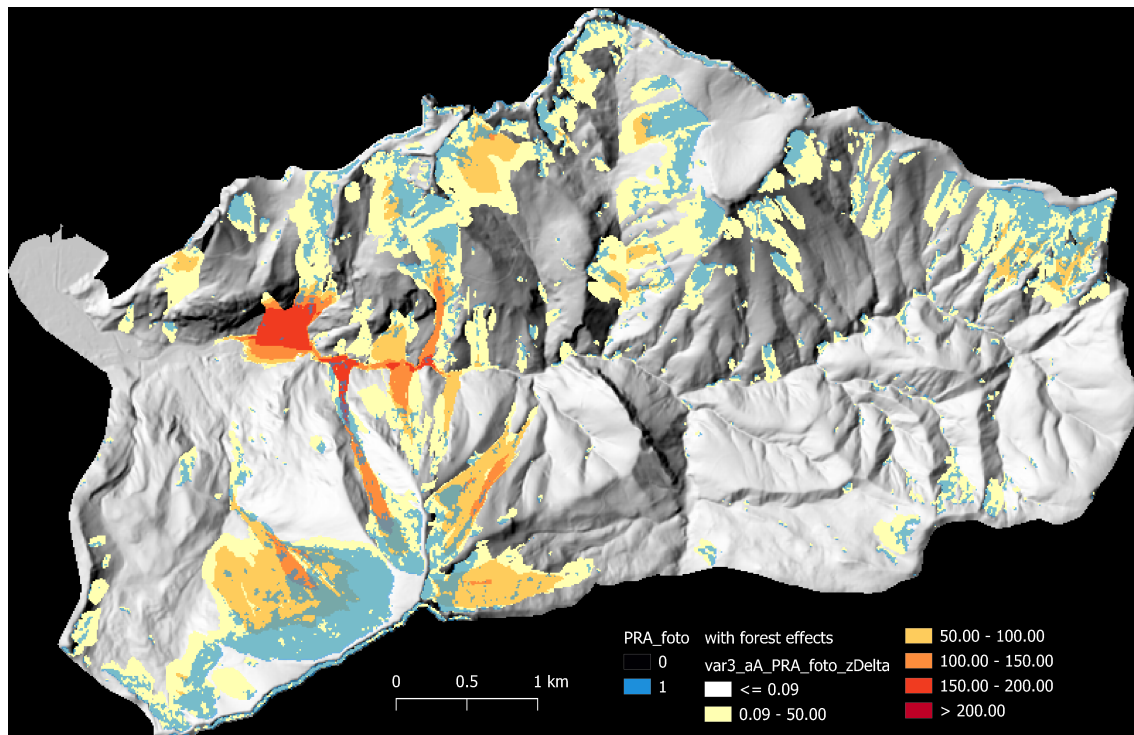


Abbildung 203 com4FlowPy-Simulationsergebnisse für PRA-Szenario D-2 (mit Waldwirkung, P-VHM) mit der Modellparameter-Kombination Var4-withFor ($\alpha = 26^{\circ}$; z_{lim}^{δ}

= 185 m; $R_{stop} = 0,003$; $\Delta_{for,max}^{\alpha} = 21^{\circ}$, skipForDist = 30 m). Blau: PRAs; Gelb-Rot: modellierte Prozessfläche und Intensität, dargestellt durch die Energielinienhöhe z^{δ}

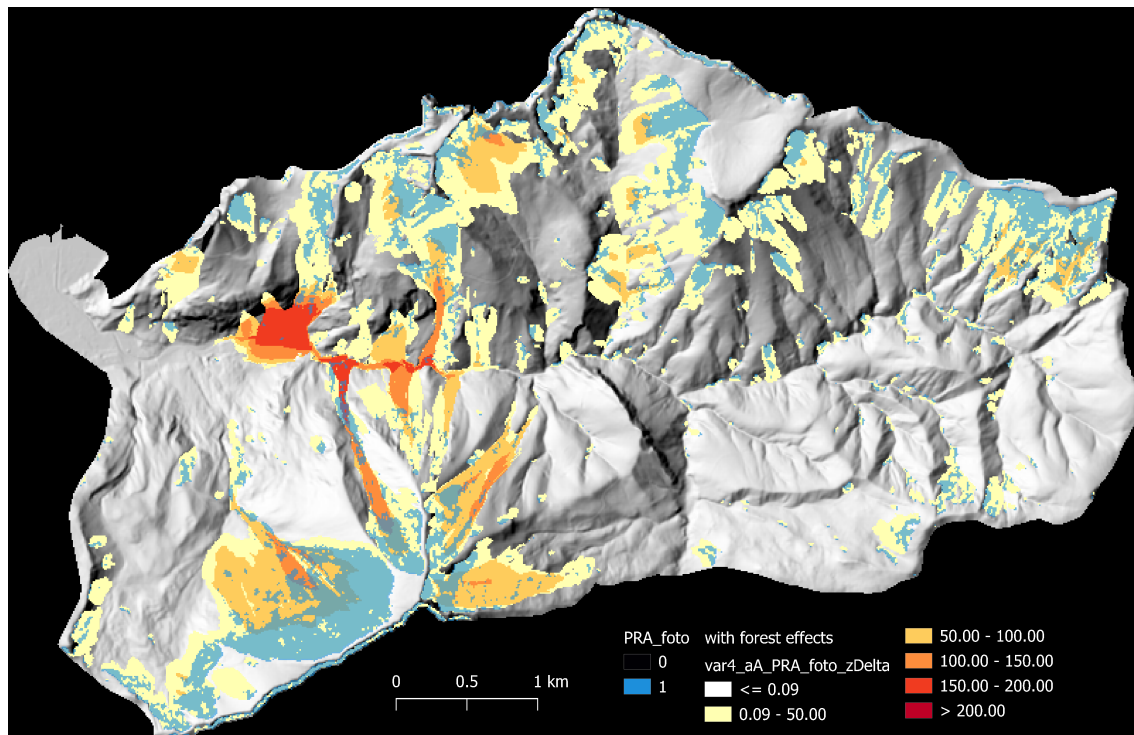


Abbildung 204 com4FlowPy-Simulationsergebnisse für PRA-Szenario D-3 (mit Waldwirkung, LiDAR-VHM) mit der Modellparameter-Kombination Var2-withFor ($\alpha = 25^{\circ}$;

$z_{lim}^{\delta} = 215 \text{ m}$; $R_{stop} = 0,003$; $\Delta_{for,max}^{\alpha} = 22^{\circ}$). Blau: PRAs; Gelb-Rot: modellierte Prozessfläche und Intensität, dargestellt durch die Energielinienhöhe z^{δ}

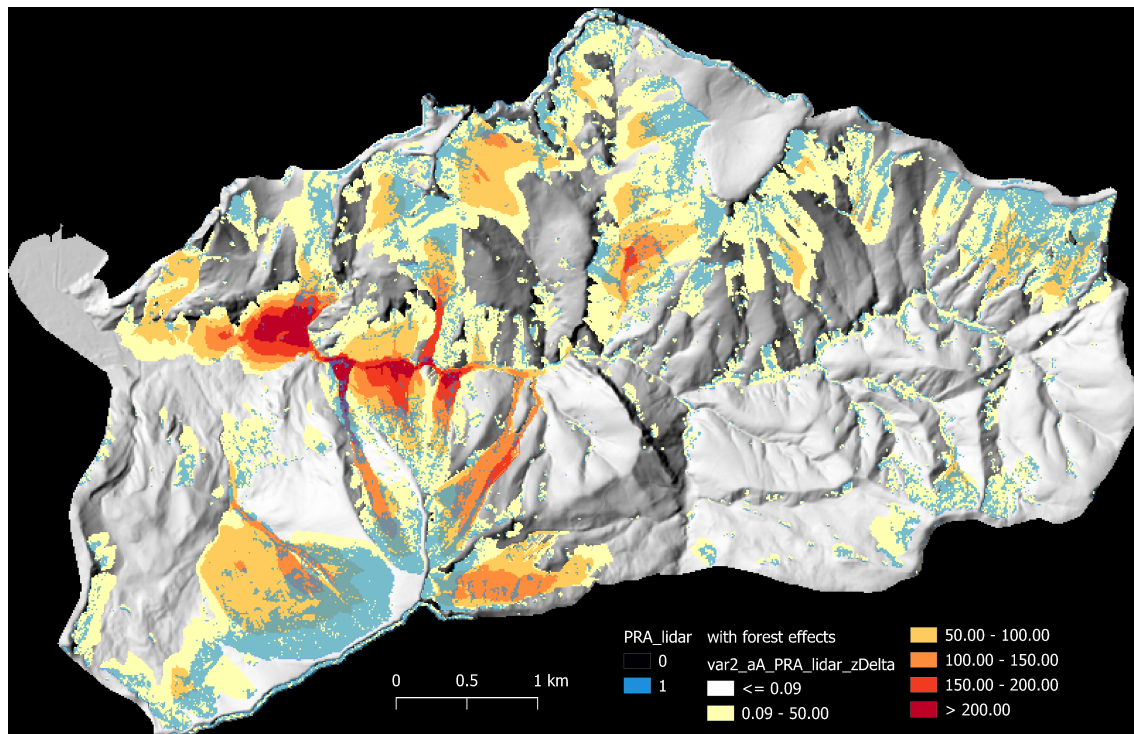
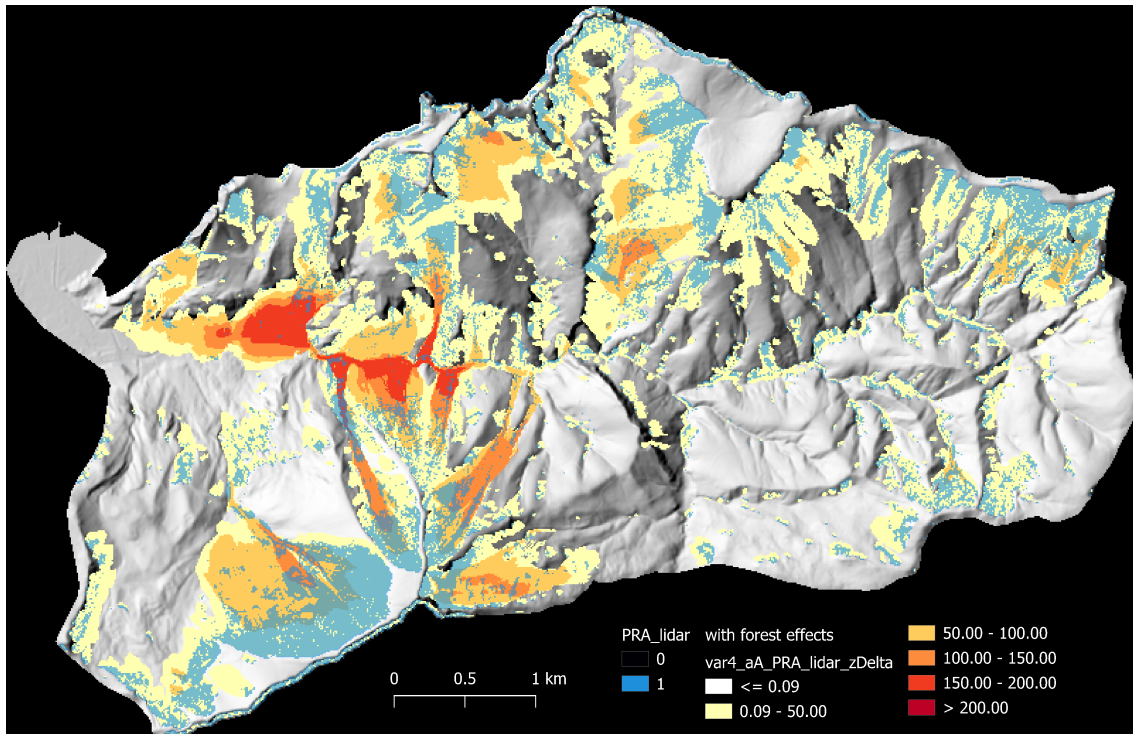


Abbildung 205 com4FlowPy-Simulationsergebnisse für PRA-Szenario D-3 (mit Waldwirkung, LiDAR-VHM) mit der Modellparameter-Kombination Var4-withFor ($\alpha = 26^{\circ}$;

$z_{lim}^{\delta} = 185 \text{ m}$; $R_{stop} = 0,003$; $\Delta_{for,max}^{\alpha} = 21^{\circ}$, skipForDist = 30 m). Blau: PRAs; Gelb-Rot: modellierte Prozessfläche und Intensität, dargestellt durch die Energielinienhöhe z^{δ}



Abkürzungen

ALS	Airborne Laser Scanning
BEV	Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen
BFW	Bundeforschungszentrum für Wald
BHD	Brusthöhendurchmesser
BML	Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft
BOKU	Universität für Bodenkultur Wien
eHYD	Hydrographischer Dienst Österreichs
FAST	Forstlichen Ausbildungsstätte BFW
GBA	Geologischen Bundesanstalt (nunmehr Geosphere Austria)
LAI	Blattflächenindex (Leave Area Index)
LiDAR	Light Detection And Range (Laser scanning)
LIS	Line Intersect Sampling
LoRaWAN	Low Range Wireless Areal Network
MEZG-Rindbach	Mustereinzugsgebiet Rindbach (Akronym des Waldfonds Projekts Nr. 101712)
MEZG	Siehe MEZG-Rindbach
OBIC	Object-Based Image Classification
OTB	Orfeo ToolBox (GIS)
ÖBf	Österreichische Bundesforste AG
PES	Payments for Ecosystem Services
PRAs	Potentielle Lawinenanbruchgebiete (Potential Release Areas)
QSP	Quadrant Sample Plot
SGes	Substratgesellschaft
UAS	Uncrewed Aerial System
ULS	Uncrewed Laser Scanning
WLV	Forsttechnischer Dienst der Wildbach- und Lawinenverbauung Österreich

WZP

Winkelzählprobe

ZEMOKOST

Niederschlags- Abflussmodell

**Universität für Bodenkultur Wien, Department für Landschaft, Wasser und Infrastruktur
Naturgefahren, Institut für Alpine Naturgefahren**

Peter-Jordan-Straße 82, 1140-Wien

<https://boku.ac.at/lawi/alpe>