

Untersuchung der Auswirkungen menschlicher Aktivität auf die
geomorphologischen Prozesse des Kühgrabens im Nationalpark
Gesäuse unter Verwendung von UAV-Daten

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades Master of Science (MSc)

der Studienrichtung Masterstudium Angewandte physische Geographie und
Gebirgsforschung

an der Karl-Franzens-Universität Graz

vorgelegt von

Nora LANDL, BSc

am Institut für Geographie und Raumforschung

Begutachter Ao. Univ.-Prof. Mag. Dr.rer.nat Wolfgang SULZER

Graz, Jänner 2022

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne unerlaubte Beihilfe verfasst habe. Ich habe keine weiteren Quellen verwendet, außer den von mir im Literaturverzeichnis angeführten und wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht.



Nora Landl

Graz, Jänner 2022

Vorwort und Danksagung

Schon als Kind war ich von den Bergen meiner Heimat und deren Gewalten in Form von Lawinen oder Felsstürzen fasziniert. Durch kleine Umwege kam ich zuerst zum Bachelorstudium der Umweltsystemwissenschaften mit Schwerpunkt Geographie, welches mir half, die einzelnen Interaktionen in der Natur zu verstehen. Durch die entwickelte Faszination für Drohnen, Luft- und Satellitenbilder bildete sich der Schwerpunkt Fernerkundung in meiner Ausbildung. Als studentische Mitarbeiterin bei Ao.Univ.-Prof. Dr. Wolfgang Sulzer konnte ich Erfahrungen im Umgang mit Drohnen und in der Auswertung und Analyse der Daten sowie deren 3D-Darstellung sammeln und war begeistert. Das Thema dieser Arbeit verbindet meine Heimat mit den geographischen Aspekten und einem fernerkundlichen Thema. Durch die Unterstützung des Nationalparks Gesäuse konnten ausreichend Daten aufgenommen und Literatur für die Umsetzung dieser Arbeit bereitgestellt werden.

Mit der Unterstützung von einigen Personen konnte diese Masterarbeit verwirklicht werden: Für die Betreuung meiner Arbeit, die Durchführung der Drohnenbefliegung und fachliche Unterstützung möchte ich mich bei Ao.Univ.-Prof. Dr. Wolfgang Sulzer bedanken. Für die technische Unterstützung und Hilfe bei Problemlösungen bedanke ich mich herzlich bei Matthias Wecht. Beim Nationalpark Gesäuse, besonders Mag. Alexander Maringer, möchte ich mich für die kollegiale und hilfreiche Kommunikation sowie die unbürokratische Erlaubnis für die Drohnenbefliegung des Kühgrabens bedanken sowie für die Ermöglichung der Befahrung der Forststraße, was die Feldarbeit ungemein erleichtert hat. Bei meinen Freunden und Studienkollegen möchte ich mich für die unvergessliche gemeinsame Zeit während des Studiums und die herzliche Unterstützung bedanken, insbesondere bei meiner besten Freundin Stefanie Zefferer, welche meine Erfolge feiert, als wären sie ihre eigenen.

Am meisten bei dieser Arbeit hat mir mein Partner Dominic Held geholfen: durch die Hilfe bei der Feldarbeit, Brainstorming bei technischen Problemen, fachliche Diskurse, mentale Unterstützung bei der Analyse und dem Schreibprozess sowie die inhaltliche Korrektur dieser Arbeit. Besonderer Dank gilt meiner Familie für die seelische und finanzielle Unterstützung, meiner Mutter und meinem Vater für den Glauben an mich und meiner Schwester außerdem für das Korrekturlesen dieser Arbeit. Ohne euch wäre dieses Studium nie möglich gewesen.

Abstract

This paper deals with the recording of human activity and the change of a highly process-influenced area. The Kühgraben in the Gesäuse National Park in Styria, Austria, was chosen as a trench with episodic water flow and a high relief energy with associated high morphodynamics.

Data acquisition was carried out by UAV and aerial images were processed from four out of five taken flights using the SfM method.

The results of this processing were digital point clouds, orthophotos and terrain models, whose georeferencing was implemented using Tie Points from the Digital Atlas of Styria. The elevation models were cut to size to the four selected detail areas and investigated for elevation changes using the DEM of Difference method. These analyses could be used to analyse the changes in elevation of the individual detail areas in terms of the influence of human activity and its effect. By comparing the results with the aerial photographs, areas were highlighted which were influenced in height by humans by construction and/or renovation measures. High change rates are due to a resolution of 34.6 centimetres and shadow areas, which exhibit greater uncertainty. The elevation models created from the historical aerial photographs and the UAV images were also examined for their accuracy using comparison points with the ALS images. Vegetation mapping was also used to detect changes. Individual mapping classes were selected in such a way as to show a change in the prevailing vegetation cover, as well as in the renovation measures, in the debris areas and in the individual constructions. This analysis of change also reveals the effects of human activity.

Based on the results, it can be stated that the structural and biological-engineering measures had significant impact on the processes of the Kühgraben and still do today. In addition, UAV data are very suitable for the analysis of altitude changes. In combination with the analysis of historical aerial images with lower geometric resolution and longer time intervals, only larger change data can be determined.

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Erfassung von menschlicher Aktivität und der Veränderung eines stark prozessbeeinflussten Gebietes. Als Gebiet wurde der Kühgraben im Nationalpark Gesäuse in der Steiermark, Österreich als ein Graben mit episodischer Wasserführung und einer hohen Reliefenergie mit einhergehender hoher Morphodynamik gewählt.

Die Datenerfassung erfolgte mittels UAV und die Luftbilder aus vier von fünf Befliegungsteilen wurden mit der SfM-Methode prozessiert.

Die Ergebnisse dieser Prozessierung waren digitale Punktwolken, Orthophotos und Geländemodelle, deren Georeferenzierung mittels Tie Points aus dem Digitalen Atlas Steiermark umgesetzt wurde. Die erstellten Höhenmodelle wurden auf die vier ausgewählten Detailgebiete zugeschnitten und durch die Methode des DEM of Difference auf Höhenänderungen untersucht. Aufgrund dieser Analysen könnten die Höhenänderungen der einzelnen Detailgebiete auf das Einwirken menschlicher Aktivität und deren Auswirkung hin analysiert werden. Durch den Abgleich der Ergebnisse mit den Luftbildern verdeutlichten sich Bereiche, welche durch Bau- und/oder Sanierungsmaßnahmen menschlich in ihrer Höhe beeinflusst wurden. Hohe Änderungsraten begründen sich in einer Auflösung von 34,6 Zentimetern und Schattenbereichen, welche größere Unsicherheiten aufweisen. Die erstellten Höhenmodelle aus den historischen Luftbildern und den UAV-Aufnahmen wurden außerdem mit den ALS-Aufnahmen mithilfe von Vergleichspunkten auf ihre Genauigkeit untersucht. Die Vegetationskartierung wurde für eine Detektion von Veränderungen hinzugezogen. Einzelne Kartierungsklassen wurden so gewählt, dass sowohl eine Veränderung der vorherrschenden Vegetationsbedeckung als auch der Sanierungsmaßnahmen, der Schuttflächen und der einzelnen Verbauungen ersichtlich wird. Auch bei dieser Veränderungsanalyse werden die Auswirkungen menschlicher Aktivität deutlich. Basierend auf den Ergebnissen lässt sich festhalten, dass die bautechnischen und ingenieurbiologischen Maßnahmen deutliche Auswirkungen auf die Prozesse des Kühgrabens hatten und auch heute noch haben. Außerdem eignen sich UAV-Daten sehr gut für die Analyse von Höhenänderungen. In Kombination mit der Analyse von historischen Luftbildern mit geringerer geometrischer Auflösung und längeren zeitlichen Abständen können hauptsächlich nur größere Änderungsdaten bestimmt werden.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	11
1.1 Problemstellung und Ziele	11
1.2 Forschungsfragen	13
1.3 Methoden	13
2. Untersuchungsgebiet	15
2.1 Allgemeines	15
2.2 Geologische und geomorphologische Gegebenheiten	17
2.3 Klimatologische und hydrologische Verhältnisse	20
3. Grundlagen	25
3.1 UAVs	25
3.2 SfM – Photogrammetrie	28
3.3 DEM of Difference – Vergleich	30
3.4 Auswirkungen menschlicher Aktivität	32
3.4.1 Sanierungsplan Kühgraben	34
4. Prozessierung	35
4.1 UAV-Daten	35
4.1.1 Planung und Erfassung	35
4.1.2 Prozessierung	36
4.2 Historische Luftbildauswertung	41
5. Ergebnisse	44
5.1 Genauigkeitsanalyse	44
5.2 UAV – ALS Vergleich	47
5.3 Dem of Difference (DoD)	49
5.3.1 DoD – DG 1	49
5.3.2 DoD – DG 2	55
5.3.3 DoD – DG3	58
5.3.4 DoD – DG4	61

5.4	Detailgebietkartierung	64
5.4.1	Kartierung – DG 1.....	64
5.4.2	Kartierung – DG 2.....	67
5.4.3	Kartierung - DG 3	68
5.4.4	Kartierung – DG 4.....	70
5.5	Vergleich Rotgraben	74
5.5.1	Bautechnische Maßnahmen	74
5.5.2	Vergleich der Geologie	75
6.	Diskussion.....	76
7.	Fazit	81
	Quellverzeichnis	83

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Workflow Masterarbeit Landl (eigene Darstellung)	14
Abbildung 2. Untersuchungsgebiet Kühgraben in Bezug auf Lage im Nationalpark Gesäuse und des Bezirkes Liezen (eigene Darstellung, Datengrundlage: Straßen Basemap - Environmental Systems Research Institut (ESRI) 2021a, Digitaler Atlas Steiermark 2021a)	15
Abbildung 3: Ausgewählte Detailgebiete des Kühgrabens (eigene Darstellung, Datengrundlage: Satellitendaten - Environmental Systems Research Institut (ESRI) 2021a)	16
Abbildung 4: Geologie des Untersuchungsgebiets Kühgraben (eigene Darstellung nach Ampferer 1935) [sic!].....	17
Abbildung 5: Geologie der ausgewählten Detailgebiete (eigene Darstellung, Datengrundlage: Digitaler Atlas Steiermark 2021a, Ampferer 1935) [sic!].....	19
Abbildung 6: Disposition von Ereignissen im Untersuchungsgebiet (eigene Darstellung nach Stangl 2009)	20
Abbildung 7: Durchschnittliche Niederschlagssummen in mm im Jahr (eigene Darstellung, Datengrundlage: Digitaler Atlas Steiermark 2021b).....	21
Abbildung 8: Durchschnittliche maximale Schneehöhen (eigene Darstellung, Datengrundlage: Digitaler Atlas Steiermark 2021b).....	22
Abbildung 9: Jährliche Niederschlagssummen mit Trendlinien der Jahre 1961-1990 und 1991 – 2020; hellblau gekennzeichnet die Untersuchungsjahre dieser Masterarbeit; Daten der Wetterstation Gstatterboden (eigene Darstellung, Datengrundlage: Hydrographischer Dienst Steiermark 2021)	24
Abbildung 10: EU-Regulativ (Quelle: Austro Control 2021)	27
Abbildung 11: Projektbasierter Workflow SfM (eigene Darstellung nach Smith et al. 2016)	29
Abbildung 12: DEM of Difference- Vergleich 2016 - 2020 (eigene Darstellung)	31
Abbildung 13: Lageplan des Verbauungsprojektes Kühgraben (eigene Darstellung nach Wildbach und Lawinenverbauung 2002).....	35
Abbildung 14: Standorte und UAV-Befliegungen und Länge sowie Abdeckung der einzelnen Flüge (eigene Darstellung, Datengrundlage: ESRI 2021a)	36
Abbildung 15: Processing Report aus Agisoft Metashape Camera locations und Image overlap (eigene Datengrundlage)	38
Abbildung 16: Historisches Luftbild 1954 (Quelle: BEV 2021).....	42

Abbildung 17: Georeferenzierung mittels Passpunkten (eigene Darstellung).....	43
Abbildung 18: Vergleichspunkte für die Genauigkeitsanalyse (eigene Darstellung) .	44
Abbildung 19: Darstellung Abweichung Vergleichspunkte 1954 - 2016 von ALS von 2010 (eigene Darstellung)	46
Abbildung 20: Vergleichspunkte UAV mit TLS Vergleich (eigene Darstellung).....	48
Abbildung 21: DoD 1973-1997 DG1(eigene Darstellung).....	50
Abbildung 22: DoD 1997-2004 DG1 (eigene Darstellung).....	51
Abbildung 23: DoD 2013-2016 DG1 (eigene Darstellung).....	53
Abbildung 24: DoD 2016-2020 DG1 (eigene Darstellung).....	54
Abbildung 25: DoD 1973-1997 DG2 (eigene Darstellung).....	55
Abbildung 26: DoD 2004-2013 DG2 (eigene Darstellung).....	56
Abbildung 27: DoD 2013-2016 DG2 (eigene Darstellung).....	58
Abbildung 28: DoD 1973-1997 DG3 (eigene Darstellung).....	59
Abbildung 29: DoD 1997 - 2004 DG3 (eigene Darstellung).....	60
Abbildung 30: DoD 2004-2013 DG3 (eigene Darstellung).....	61
Abbildung 31: DoD 2004-2013 DG4 (eigene Darstellung).....	62
Abbildung 32: DoD 2016-2020 DG4 (eigene Darstellung).....	63
Abbildung 33: Vegetationskartierung DG1 1954, 1973 und 1997 (eigene Darstellung)	64
Abbildung 34: Vegetationskartierung DG1 2004, 2013, 2016 und 2020 (eigene Darstellung).....	65
Abbildung 35: Veränderungen durch menschliche Aktivität DG1 (eigene Darstellung)	66
Abbildung 36: Vegetationskartierung DG2 alle Jahre (eigene Darstellung).....	67
Abbildung 37: Vegetationskartierung DG3 1954, 1973 und 1997 (eigene Darstellung)	68
Abbildung 38: Vegetationskartierung DG3 2004, 2013, 2016 und 2020 (eigene Darstellung).....	69
Abbildung 39: Veränderungen durch menschliche Aktivität DG3 (eigene Darstellung)	70
Abbildung 40: Vegetationskartierung DG4 1954, 1973 und 1997 (eigene Darstellung)	70
Abbildung 41: Vegetationskartierung DG4 2004, 2013, 2016 und 2020 (eigene Darstellung).....	71

Abbildung 42: Veränderungen durch menschliche Aktivität 1973-2004 DG4 (eigene Darstellung)	72
Abbildung 43: Veränderungen durch menschliche Aktivität 2004-2020 DG4 (eigene Darstellung)	73
Abbildung 44: Lageplan des Verbauungsprojektes Rotgraben (eigene Darstellung nach Wildbach und Lawinenverbauung 2002).....	74
Abbildung 45: Geologie Küh- und Rotgraben (eigene Darstellung, Datengrundlage: Digitaler Atlas Steiermark 2021a, Ampferer 1935) [sic!]	75

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Abstand der einzelnen Zeitperioden zueinander (eigene Datengrundlage)	32
Tabelle 2: Ergebnisse Prozessierung UAV-Daten (eigene Datengrundlage).....	37
Tabelle 3: Ergebnisse Flüge (eigene Datengrundlage)	39
Tabelle 4: Prozessierung historischer Luftbilder (eigene Datengrundlage)	42
Tabelle 5: Vergleichspunkte UAV - ALS Vergleich (eigene Datengrundlage).....	49

1. Einleitung

Das Thema dieser Arbeit wurde gewählt, um ein besseres Verständnis für die geomorphologischen Prozesse in einem Schuttgraben und deren Beeinflussung und mögliche Eindämmung durch den Menschen zu geben. Dafür wurden diese Prozesse zuerst definiert, die menschliche Aktivität untersucht und deren Auswirkung auf die Prozesse analysiert.

1.1 Problemstellung und Ziele

Das Hauptaugenmerk dieser Masterarbeit liegt auf der Untersuchung der Auswirkungen anthropogener Faktoren auf die geomorphologischen Prozesse des Kühgrabens im Nationalpark Gesäuse. Als entscheidende Prozesse, welche im Kühgraben die vorhandene Infrastruktur sowie Menschen gefährden, sind in den Sommermonaten Muren und in den Wintermonaten fallweise Lawinen zu nennen (Nationalpark Gesäuse GmbH 2014). Durch diese Prozesse wird auch die Morphologie des Grabens aufgrund von Geschiebeverlagerung im Grabenbereich, Abtrag an den Hängen und Auswirkungen auf die Vegetation verändert (Skacel 2013, Nationalpark Gesäuse GmbH 2014). Generell stellen viele solcher Gräben, welche gravitative Massenprozesse begünstigen und durch ihre Steilheit Geschiebe Richtung Tal führen, eine Problematik für Mensch und Infrastruktur dar. Der menschliche Einfluss ist in diesen Fällen als Eingriff in die Natur aber durch seine Schutzwirkung als positiv anzusehen.

Da der Kühgraben als Bewahrungszone des Nationalparks ausgewiesen ist, wurden von der Wildbach- und Lawinenverbauung, um diese Schadwirkungen zu minimieren, von 1991 bis 2003 technische und ingenieurbioologische Maßnahmen zur Geschiebebekämpfung gesetzt (Skacel 2013, Holzinger et al. 2012). Das Untersuchungsgebiet dieser Arbeit wurde in einzelne Detailgebiete aufgeteilt, welche anthropogen geprägt wurden. Dies umfasst Bereiche, in denen Verbauungen gesetzt wurden oder Straßen und Wege den Kühgraben schneiden und nicht nur von den geogenen Faktoren abhängig sind, um speziell die Auswirkungen menschlicher Aktivität (näher beschrieben siehe Kapitel 3.4) zu analysieren. Es wurden Fernerkundungsanalysen gewählt, da der Graben durch seine Länge und Steilheit den Einsatz anderer Methoden erschwert und die steilen Hangbereiche dadurch besser

abgebildet und analysiert werden können. Auch das gefahrlose Begehen wäre in diesem Fall durch die Gefahr von Steinschlag nicht gegeben gewesen.

Aus dieser Problemstellung ergeben sich folgende Ziele und grundlegende Punkte dieser Arbeit:

(1) Das Untersuchungsgebiet (Kühgraben) mittels Unmanned Aerial Vehicle (UAV) zu befliegen und hochauflösende Luftbilder der aktuellen Situation von Juli 2020 aufzunehmen.

(2) Aus diesen Bildern mittels der Structure from Motion (SfM) Methode Orthophotos, Oberflächenmodelle und Punktwolken zu erstellen.

(3) Historische Luftbilder der Jahre 1954, 1961, 1973, 1997 und 2004 ebenfalls mit der SfM zu analysieren und Orthophotos, Oberflächenmodelle und Punktwolken zu erstellen.

(4) Das Ergebnis soll mit den offiziellen Laserscandaten des Landes Steiermark aus dem Jahr 2010 verglichen werden.

(5) Durch die erzielten Ergebnisse soll eine Aussage darüber, ob sich UAV-Aufnahmen für die Erfassung von Veränderungen, welche durch menschliche Aktivität verursacht wurden, getroffen werden.

Der Hauptteil dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Analyse der Höhenänderung des Grabenbereichs in den Detailgebieten durch menschliches Eingreifen in Form von Straßenbau oder Vermeidung bzw. Eindämmung geomorphologischer Aktivitäten durch ingenieurbioökologische und technische Maßnahmen. Einen weiteren wichtigen Teil stellt die Detailgebietskartierung betreffend Verbauungen, Rekultivierung und Schutt- sowie Vegetationsflächen des Kühgrabens dar. Ziel dieser Arbeit ist es nicht, die Veränderungen des Kühgrabens langfristig zu überwachen, sondern die Einsatzmöglichkeiten und das Potenzial der Verwendung von Fernerkundung und UAV-Daten hervorzuheben und deren Einschränkungen aufzuzeigen. Durch die Verwendung unterschiedlich erfasster Daten und Methoden können die Ergebnisse nur eingeschränkt interpretiert werden. Der praktische Teil der Datenerfassung und Prozessierung hat somit eine wesentliche Bedeutung in dieser Arbeit.

1.2 Forschungsfragen

Aus den oben beschriebenen Punkten ergeben sich die Forschungsfragen, welche die Thematik der Veränderungsanalyse in den Detailgebieten des Kühgrabens zu behandeln versuchen:

1. *Können zwischen den Aufnahmezeitpunkten von 1954, 1961, 1973, 1997, 2004, 2013, 2016 und 2020 Veränderungen der geomorphologischen Prozesse durch das Einwirken menschlicher Aktivität mithilfe von Fernerkundung festgestellt werden?*

2. *Welche Auswirkungen hat die menschliche Aktivität im Untersuchungsgebiet?*
 - 2.1 *Welche Bereiche des Kühgrabens haben sich aufgrund von menschlicher Aktivität verändert und wodurch ist diese Aktivität zu erkennen?*

 - 2.2 *Können Veränderungen in der Höhe festgestellt werden und können diese rein auf menschliche Aktivität zurückzuführen sein?*

 - 2.3 *Wie wurde die Vegetation im Grabenbereich durch menschliche Aktivität verändert?*

1.3 Methoden

Für das Grundlagenverständnis zu den Themen UAV, SfM, Airborne Laser Scan (ALS), Höhenänderungsanalysen sowie die Beschreibung der einzelnen Methoden und der geologischen, geomorphologischen, klimatologischen und hydrologischen Gegebenheiten wurde die Methode der Literatur- und Internetrecherche gewählt. Für die Feldarbeit war keine Flugplanung notwendig, da die Befliegung manuell durchgeführt wurde. Jedoch wurden vor der UAV-Befliegung passende Start- und Landepunkte mithilfe von Luftbildern ausfindig gemacht und mit dem Nationalpark Absprache gehalten, um die Forststraße zum Transport der Ausrüstung benutzen zu

dürfen sowie eine Fluggenehmigung im Nationalparkgebiet zu erhalten. Diese Start- und Landepunkte sind dabei deckungsgleich und der freie Aufstieg der Drohne nach oben sollte dabei gegeben sein. Eine niedrige Vegetation oder eine vegetationslose Fläche im Umfeld ist ebenfalls von Vorteil, um Schäden an der Drohne bestmöglich zu vermeiden. Die Zustandserfassung des Untersuchungsgebietes sowie die Überprüfung der Landbedeckung wurden mit der Aufnahme der UAV-Daten in der Feldarbeit verbunden. Die photogrammetrische Software Agisoft Metashape wurde in dieser Arbeit verwendet, da sie leicht zugänglich und kostenfrei ist und sich für die DEM-Erstellung von nicht orientierten Bilddaten eignet (Schröck und Sulzer 2016). Auch konnten durch vorangegangene Lehrveranstaltungen schon Kenntnisse im Umgang mit der SfM-Software und der Erstellung von Oberflächenmodellen, Orthophotos und Punktwolken erworben werden.

Die indirekte Referenzierung der UAV-Daten sowie der historischen Luftbilder erfolgte mittels Passpunkten aus dem Digitalen Atlas Steiermark, da bei der Befliegung keine sogenannten GCPs (ground control points) mittels Differential Global Positioning System (DGPS) eingemessen wurden. Die erstellten UAV-Oberflächenmodelle der Detailgebiete wurden mit den offiziellen ALS-Daten des Landes Steiermark (Digitaler Atlas Steiermark 2021a) mittels der ArcMap 10.7.1 Software verglichen. Um die Höhenänderungen des Kühgrabens zu erfassen, wurde die DoD-Methode (DEM of Difference) gewählt.

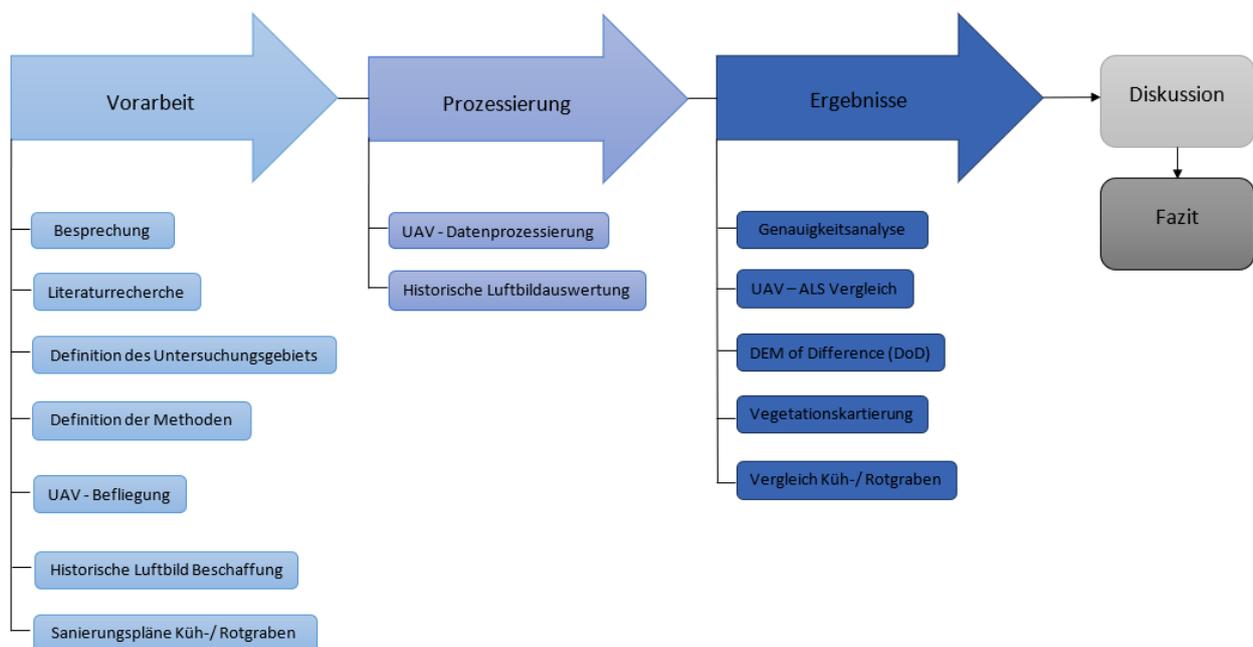


Abbildung 1: Workflow Masterarbeit Landl (eigene Darstellung)

Die dabei entstandenen Ergebnisse wurden dabei graphisch dargestellt (siehe Kapitel 5). Zuzüglich dazu wurde im Zuge der Veränderungsanalyse eine Vegetationskartierung durchgeführt.

Der Workflow dieser Arbeit (siehe Abbildung 1) wurde in drei Hauptkategorien aufgeteilt: die nötige Vorarbeit, die Prozessierung der vorhandenen Daten sowie die daraus resultierenden Ergebnisse. Darauf folgen die Diskussion dieser Arbeit, in welcher auch die Forschungsfragen noch einmal explizit beantwortet werden und das Fazit mit Ausblick.

2. Untersuchungsgebiet

2.1 Allgemeines

Das gesamte Untersuchungsgebiet befindet sich im Nationalpark Gesäuse in der

Untersuchungsgebiet Kühgraben

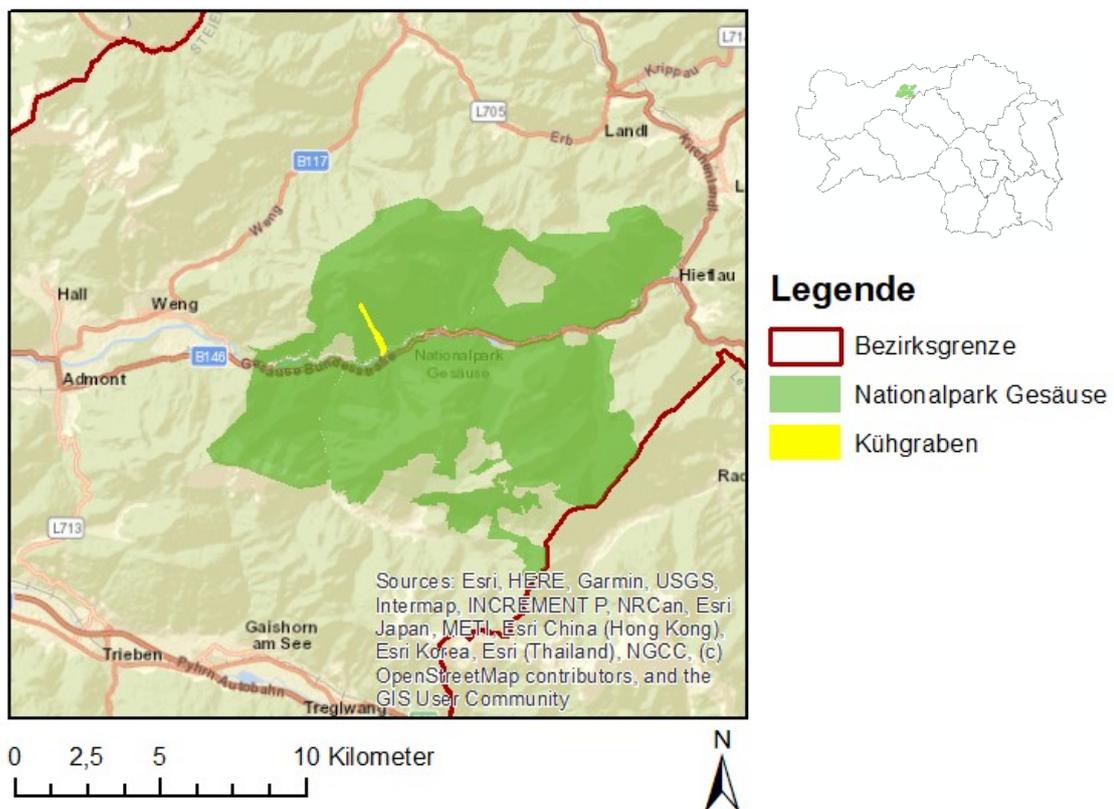


Abbildung 2. Untersuchungsgebiet Kühgraben in Bezug auf Lage im Nationalpark Gesäuse und des Bezirkes Liezen (eigene Darstellung, Datengrundlage: Straßen Basemap - Environmental Systems Research Institut (ESRI) 2021a, Digitaler Atlas Steiermark 2021a)

Obersteiermark, welcher Teil der nördlichen Kalkalpen, genauer den Ennstaler Alpen ist (siehe Abbildung 2).

Genauer zu finden ist der Kühgraben im nördlichen Teil der Gesäuseberge im Bereich des Großen Buchsteins (2224m) und ist als temporär wasserführend (Starkregen, Schneeschmelze) gekennzeichnet. Hier reicht der Graben ab der Südflanke von ca. 1983m südwärts, bis er auf einer Höhe von ca. 578m in die Enns mündet (Skacel 2013). Östlich wird der Kühgraben durch den Gerstriegel und westlich vom Bruckstein begrenzt. Im Untersuchungsgebiet wird das Hauptaugenmerk vor allem auf jene Bereiche gelegt, welche von menschlicher Aktivität geprägt sind. Daher wurde das Gebiet in einzelne Bereiche aufgeteilt (siehe Abbildung 3). Detailgebiet 1 ist der Bereich, in dem ingenieurbioologische und technische Maßnahmen in Form von Weidenflechtzäunen und Hangfußstabilisierungen gesetzt wurden. In Detailgebiet 2 schneidet eine Forststraße den Kühgraben. Bei Detailgebiet 3 schneidet erneut eine

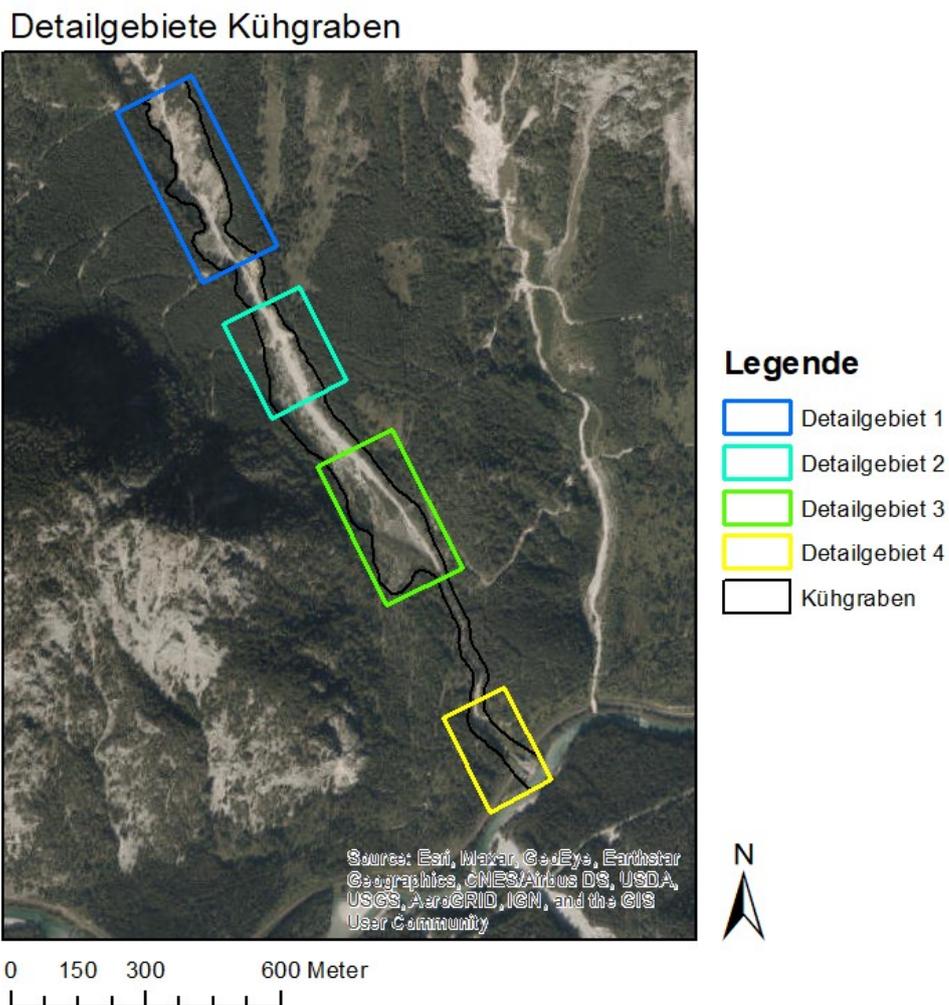


Abbildung 3: Ausgewählte Detailgebiete des Kühgrabens (eigene Darstellung, Datengrundlage: Satellitendaten - Environmental Systems Research Institut (ESRI) 2021a)

Forststraße den Graben, jedoch wurde in diesem Detailgebiet zusätzlich ein Leitdamm mit Begrünung erbaut. Bei Detailgebiet 4 sind die menschlichen Aktivitäten durch die Querung der Straße, ein Murenüberleitungsbauwerk mit Schutzdamm sowie einen Gerinneausbau vorhanden.

2.2 Geologische und geomorphologische Gegebenheiten

Die geologische Situation des Kühgrabens wird durch Hang- und Bachschuttkegel-Verhüllungen sowie den Ramsau-Dolomit in den unteren Teilen bis 1500m geprägt, welche im Bereich der Enns durch junge Flussaufschüttungen abgelöst werden (siehe Abbildung 4) (Schöttl 2017).

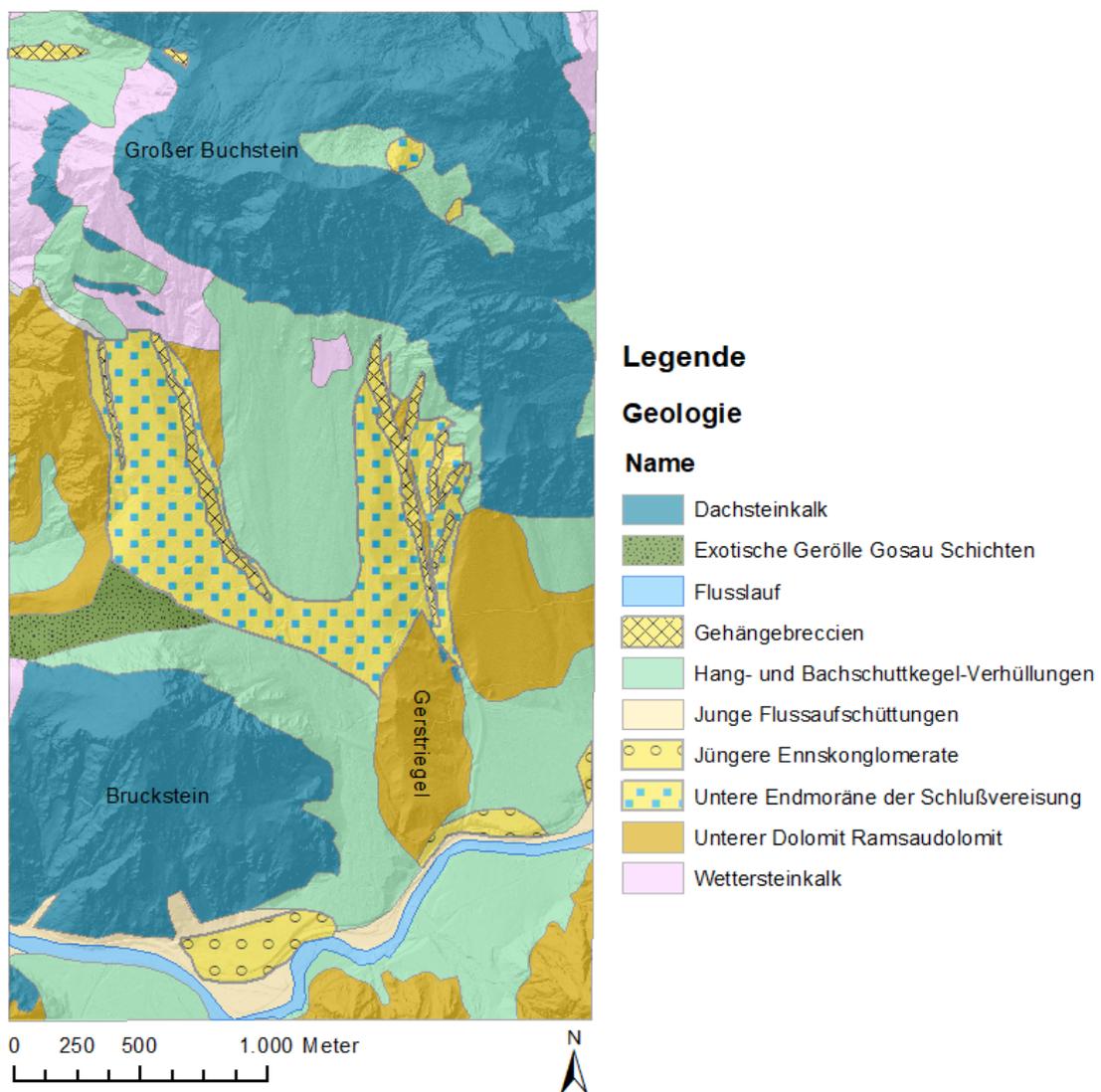


Abbildung 4: Geologie des Untersuchungsgebiets Kühgraben (eigene Darstellung nach Ampferer 1935) [sic!]

Angrenzend daran ist klüftiger Wettersteinkalk zu finden und die Südwand des Buchsteins ist geprägt von bankigem Dachsteinkalk. Der Graben ist durch die Endmoräne der letzten Vereisung überprägt, im eigentlichen Grabenbereich sind Gehängebreccien zu finden (Kammerer 2008). Begrenzt ist der Kühgraben im oberen Teil durch den Großen Buchstein aus Dachsteinkalk, im unteren westlichen Teil durch den Bruckstein, ebenfalls aus Dachsteinkalk, und im unteren östlichen Teil durch den Gerstriegel aus Ramsaudolomit.

Durch die enorme Reliefenergie, welche durch einen Höhenunterschied von 1600 Höhenmetern auf einer Länge von 3 Kilometern (ab der Oberkante des ersten Detailgebiets knapp 600 Höhenmeter auf einer Länge von 1,9 Kilometern) gegeben ist, ist der Kühgraben stark von geomorphologischen Prozessen geprägt. Die vier geomorphologischen Hauptprozesse des Kühgrabens sind Sturzereignisse, Rutschungen, Muren sowie Lawinen. Begünstigt werden diese Prozesse durch die Geologie, die Steilheit sowie die episodische Wasserführung. Steilheit begünstigt Lawinen- und in Abhängigkeit der Geologie Sturzereignisse, in Kombination mit episodischer Wasserführung begünstigt sie Muren- und Rutschungsereignisse.

Wenn man die Detailgebiete genauer betrachtet (siehe Abbildung 5), sind alle vier von unterschiedlicher Geologie geprägt. Einzig die Hang- und Bachschuttkegel-Verhüllungen kommen in jedem der Detailgebiete vor. Im Gegensatz zu der Geologie des gesamten Kühgrabens fällt auf, dass in den ausgewählten Detailgebieten weder der Dachsteinkalk noch der Wettersteinkalk oder exotischen Gerölle der Gosau Schichten [sic!] zu finden sind. Durch das Fehlen des Dachstein- und Wettersteinkalks sind die Detailgebiet keiner starken Sturzereignis-Disposition unterlegen.

Im ersten Detailgebiet finden sich diese Verhüllungen auf den östlichen Hängen, an denen später ingenieurbioologische Maßnahmen getroffen wurden (siehe Kapitel 3.4). Die westlichen Hänge sind durch Gehängebreccien, der Grabenbereich selbst durch die untere Endmoräne der Schlussvereisung geprägt. Im Detailgebiet 2 findet sich zum größten Teil die untere Endmoräne sowie an den nordöstlichen und südwestlichen Ecken ebenfalls die Hang- und Bachschuttkegel-Verhüllungen. Diese ziehen sich weiter bis in das dritte Detailgebiet, welches fast gänzlich von ihnen geprägt ist, außer im Bereich des Gerstriegels, wo der Ramsaudolomit zu finden ist. Am Fuße des Kühgrabens, Detailgebiet 4, lassen sich zusätzlich zu den Hang- und Bachschuttkegel-

Verhüllungen und dem Ramsaudolomit des Gerstriegels auch die jüngeren Flussaufschüttungen angrenzend an den Flusslauf finden.

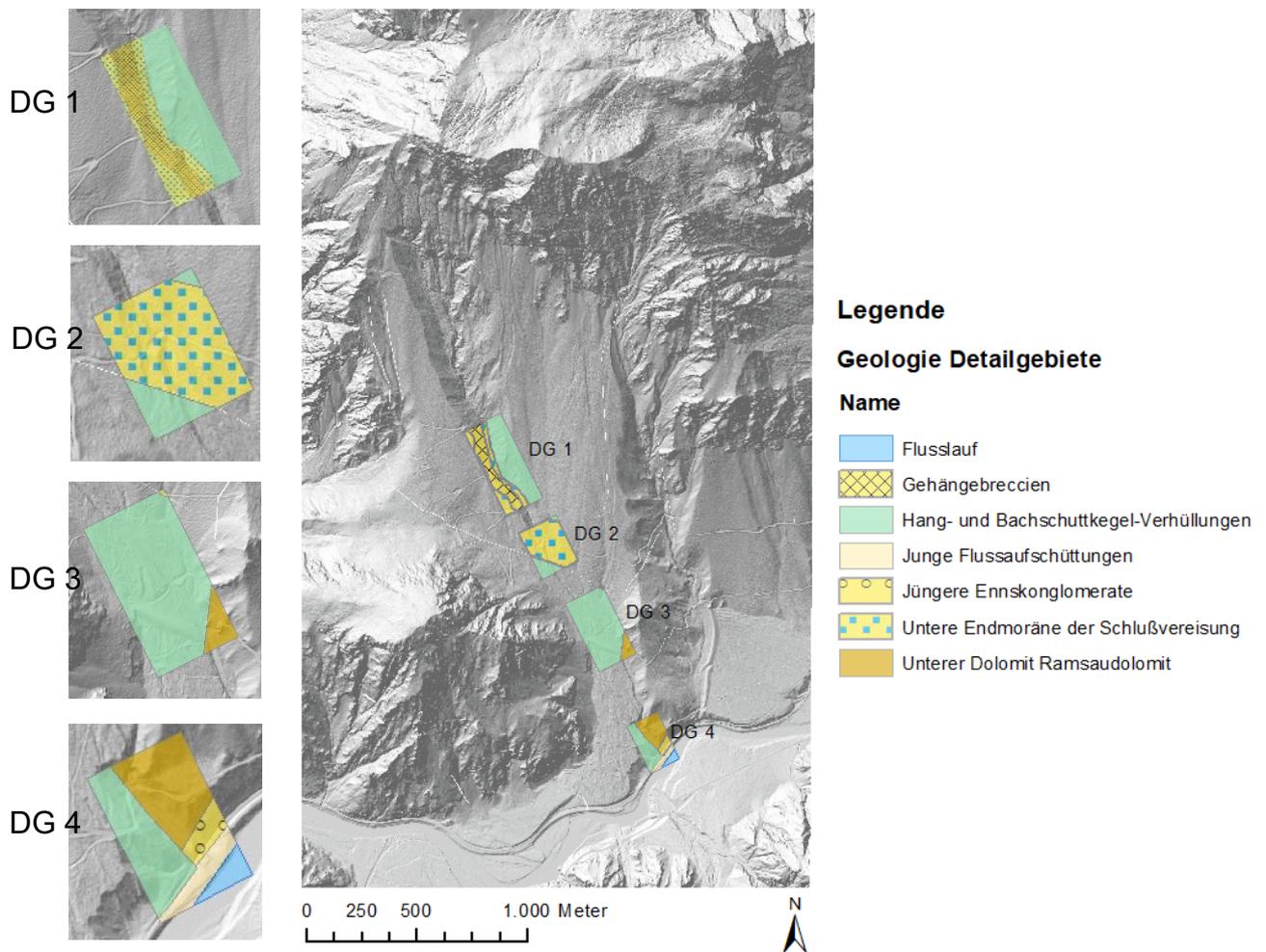


Abbildung 5: Geologie der ausgewählten Detailgebiete (eigene Darstellung, Datengrundlage: Digitaler Atlas Steiermark 2021a, Ampferer 1935) [sic!]

In Abbildung 6 von Stangl 2009 ist der Grabenverlauf des Kühgrabens in Hellblau eingezeichnet. Die Dispoitionsgewichtung gegenüber bestimmten Ereignissen reicht von null bis sehr stark. Zu sehen ist, dass der obere Teil des Kühgrabens aufgrund des Dachstein- bzw. Wettersteinkalks einer mittleren bis starken Sturzereignis-Disposition unterliegt. Die oberen Bereiche unterliegen ebenfalls starken Muren- und Lawinendispositionen, welche im unteren Teil des Grabens abnehmen. Der untere Teil ist vor allem durch Muren-Disposition im Bereich des Brucksteins geprägt, welche ebenfalls den Bereich am Gerstriegel und an der Trennung zum Rotgraben betreffen.

Disposition

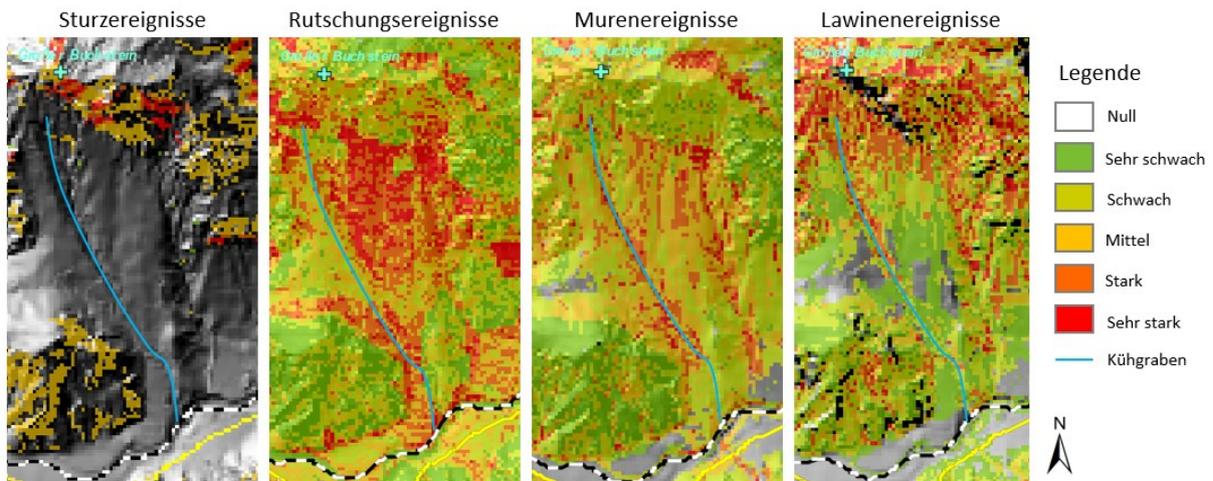


Abbildung 6: Disposition von Ereignissen im Untersuchungsgebiet (eigene Darstellung nach Stangl 2009)

2.3 Klimatologische und hydrologische Verhältnisse

Die großklimatischen Gegebenheiten des Gebiets des Nationalparks stehen unter dem Einfluss des feuchtgemäßigten, mitteleuropäisch-ozeanischen Klimas (Werschonig 2008). Dies ist geprägt von Westwinden, welche Niederschlagsfronten herantragen und da sich das Gesäuse im Nordstaugebiet befindet, kommt es zum Anstauen der Wolken an der Gebirgskette und zum Abregnen von feuchten Luftmassen (Nationalpark Gesäuse GmbH 2021). Da die vorgelagerten Kalkalpen jedoch eine Abschirmfunktion haben, fallen die Niederschlagsmengen etwas geringer aus (Hecke und Jungmeier 2017). Charakteristisch für die Witterung sind teilweise anhaltende Niederschlagsperioden, welche von 1200 bis über 2500mm pro Jahr mit sich bringen können (Nationalpark Gesäuse GmbH 2021). Starkregenereignisse im Sommerhalbjahr können zu Geschiebeumlagerungen und gegebenenfalls zu Muren und Geschiebelawinen führen.

Ein sekundäres Niederschlagsmaximum im Winter führt zu einer langen Periode mit Schneebedeckung, welche durch andauernde Niederschläge im Frühjahr verlängert werden kann (Hecke und Jungmeier 2017). Im Winter können Niederschlagsmaxima mit großen Schneemengen zu Lawinen führen und Schmelzwässer im Frühjahr führen zum Abtransport von Lockermaterial. Schönwetter kommt vor allem bei Wetterlagen mit südlicher Strömung vor, im Winter sind Föhnperioden häufig, welche

Tauwetterperioden einleiten oder bei größerer Stärke Windwurfflächen im Waldgebiet hinterlassen (Nationalpark Gesäuse GmbH 2021).

Mikroklimatisch bringen die südexponierte Lage des Kühgrabens, leichte Talwinde sowie wenig vorhandene Vegetation hohe tageszeitliche Schwankungen der Bodentemperatur mit sich. Durch die offenen Böden kommt es in den höher gelegenen Bereichen der Hänge zu einer früheren Ausaperung, wohingegen sich Schneeakkumulationen in den unteren Bereichen länger halten können (Skacel 2013, Hecke und Jungmeier 2017).

In den Abbildungen 7 und 8 werden die Daten des Digitalen Atlas Steiermark bezüglich der durchschnittlichen Niederschlagssummen in mm im Jahr und der durchschnittlichen maximalen Schneehöhen als geogene Faktoren dieses Untersuchungsgebiets dargestellt, um einen Eindruck der hydrologischen Gegebenheiten dieses Grabens zu bekommen.

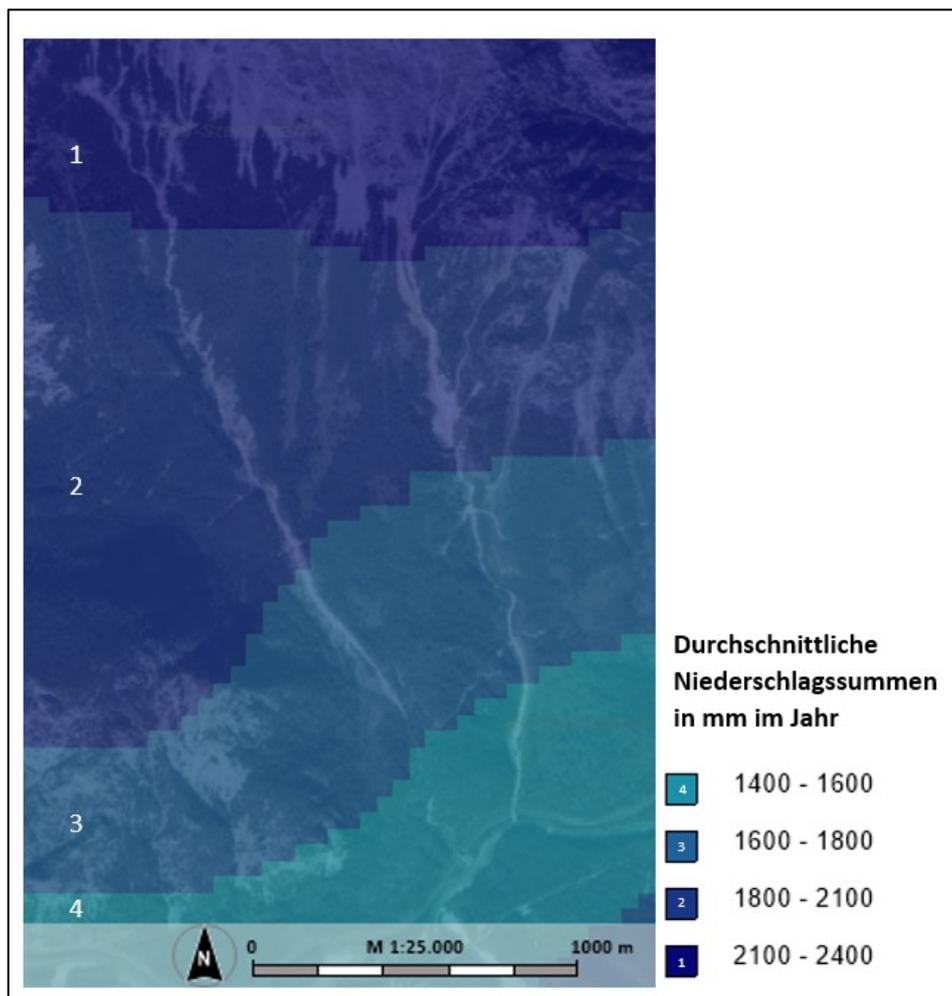


Abbildung 7: Durchschnittliche Niederschlagssummen in mm im Jahr (eigene Darstellung, Datengrundlage: Digitaler Atlas Steiermark 2021b)

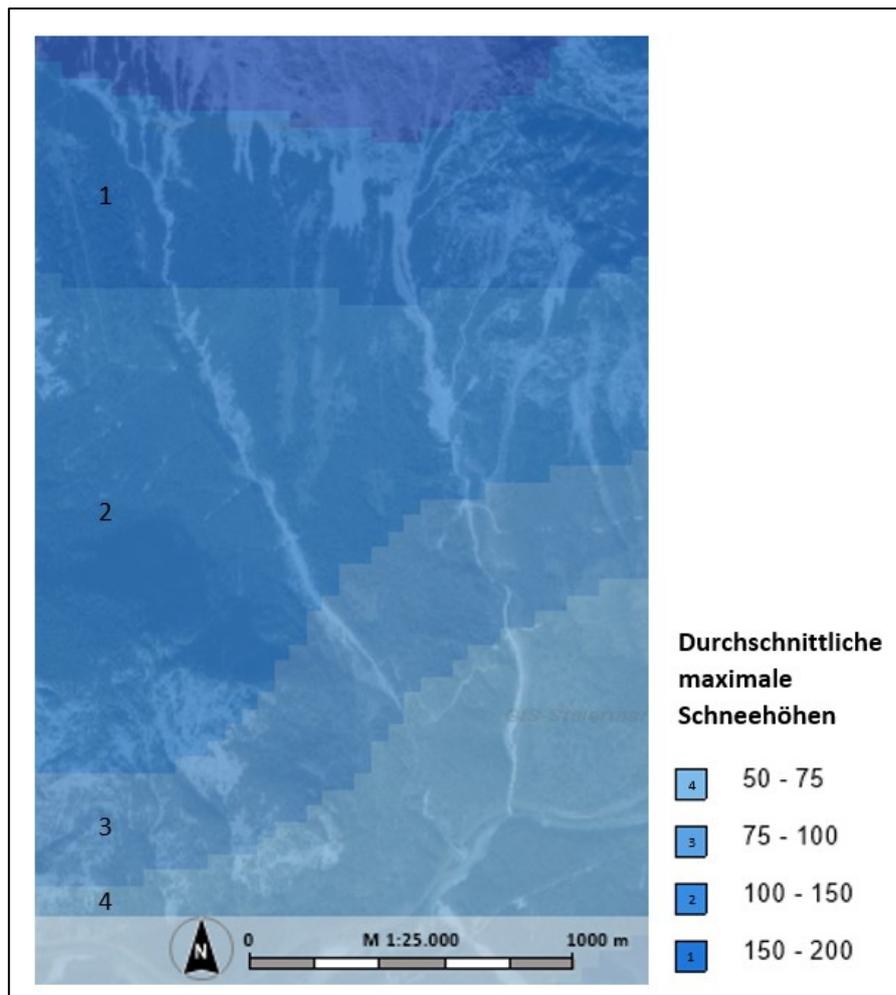


Abbildung 8: Durchschnittliche maximale Schneehöhen (eigene Darstellung, Datengrundlage: Digitaler Atlas Steiermark 2021b)

In Abbildung 9 werden die Niederschlagsdaten der Messtation Gstatterboden 510 des Hydrographischen Dienstes Steiermark für die in dieser Arbeit verwendeten Datenreihe dargestellt. Die einzelnen Untersuchungsjahre dieser Arbeit sind in Hellblau gekennzeichnet.

In der Datenreihe dieser 66 Jahre zählen 1954, 1965, 1970, 1974, 2009, 2016 und 2017 zu den niederschlagsreichsten Jahren mit über 1700 mm im Jahr. Die vier niederschlagsreichsten Jahren daraus sind 1954, 1965, 2016 und 2017, wobei zwei dieser Jahre als Untersuchungsjahre in dieser Arbeit verwendet wurden. Die niederschlagsärmsten sind 1963, 1969, 1971, 1978, 1984 und 1999 mit unter 1100 mm im Jahr. Der Mittelwert der Niederschlagssummen der gesamten zur Verfügung gestellten Daten beträgt 1404,1mm jährlich. Weiters ist eine leichte zunehmende Tendenz beim Niederschlag festzustellen. Die rote Trendlinie der Zeitperiode 1961-1990 zeigt dabei eine leicht fallende Tendenz mit -3,85mm Rückgang pro Jahr.

Hingegen steigt die Trendlinie mit einem Zuwachs von 3,48mm pro Jahr über die Zeitperiode der letzten 30 Jahre (1991-2020). In der betrachteten Zeitspanne der roten Trendlinie liegen die meisten Jahre zwischen 900 und 1400mm, in der Zeitspanne der gelben Trendlinie zwischen 1300 und 1800mm. An dieser Stelle sei festgehalten, dass diese Werte, für die sich im Talbereich befindliche Messtation gelten. Eine genauere Aussage über die lokalen Verhältnisse im Kühgraben durch Abschottungseffekte etc., speziell durch festfallenden Niederschlag, kann an dieser Stelle nicht getroffen werden. Die Trendlinien wurden jeweils für 30 Jahre berechnet, da laut Empfehlung der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) 30 Jahre zur Erfassung des Klimas herangezogen werden sollen.

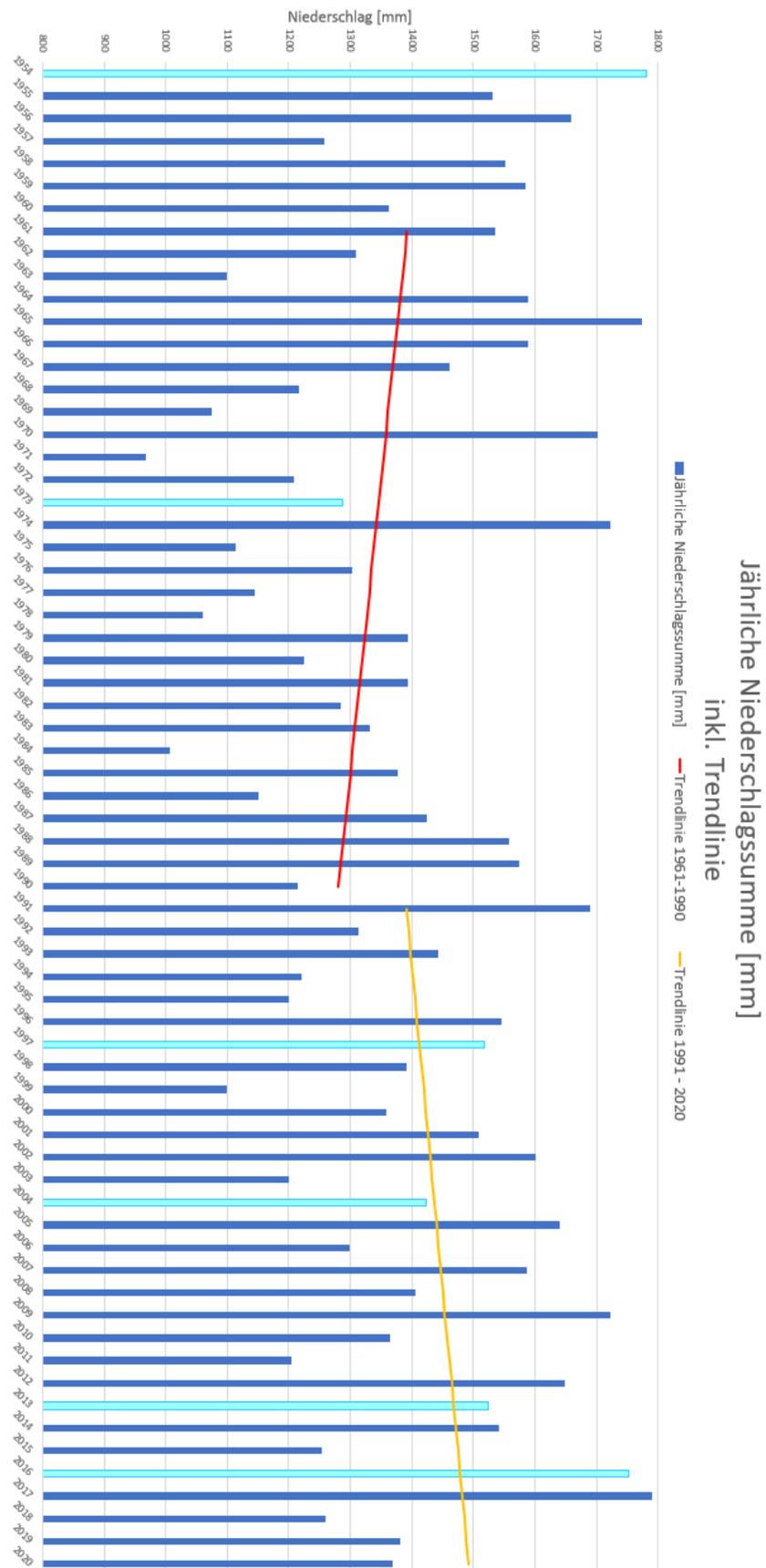


Abbildung 9: Jährliche Niederschlagssummen mit Trendlinien der Jahre 1961-1990 und 1991 – 2020; hellblau gekennzeichnet die Untersuchungsjahre dieser Masterarbeit; Daten der Wetterstation Gstatterboden (eigene Darstellung, Datengrundlage: Hydrographischer Dienst Steiermark 2021)

3. Grundlagen

3.1 UAVs

In der Aufnahme der Daten dieser Masterarbeit wird der Begriff des Unmanned Aerial Vehicle (UAV) verwendet. Dieses ist auch unter Namen wie Unmanned Aerial System (UAS), Remotely Piloted Vehicle (RPV) oder Drohne bekannt (Siebert und Teizer 2014, Schöttl 2017). Im österreichischen Luftfahrtgesetz wird der Begriff Unbemanntes Luftfahrzeug (ULFZ) verwendet (RIS 2016, Schöttl 2017). Die oben genannten Begriffe werden oft als Synonyme verwendet. UAVs bieten eine Plattform, welche mit einem photogrammetrischen Messsystem, einschließlich einem kleinen oder mittleren Standbild-Video oder einer Videokamera, Wärmebild- oder Infrarot- Kamerasystemen, luftgestützten LiDAR-Systemen oder einer Kombination daraus ausgestattet ist (Eisenbeiß 2009). UAS bestehen aus weiteren Komponenten wie Fernsteuerung, Kommunikation, einer Bodenstation etc. (Colomina und Molina 2014, Schöttl 2017). Der Hauptunterschied zu Flugzeugen ist, dass bei einem UAV kein Pilot physisch an Bord anwesend sein muss. Diese Fluggeräte sind ferngesteuert, halbautonom, autonom oder besitzen eine Kombination aus diesen Fähigkeiten (Eisenbeiß 2009). Unterteilt werden sie bei Colomina und Molina (2014) in Micro (< als 5kg), Mini (< als 30kg) und Tactical (< als 150 kg). Eisenbeiß (2009) kategorisiert sie in mit oder ohne Antrieb, leicht oder schwer wie Luft- Systeme und in flexible, fixed und rotary wing.

In dieser Arbeit wurde, nach der Definition von Colomina und Molina (2014), ein Micro-UAV für den Zweck der Fernerkundung verwendet. Der primäre Anwendungsbereich der UAVs bezog sich früher auf einen militärischen Kontext. Die kommerzielle Nutzung wurde durch die Kosten, die Größe der Sensoren sowie die selektive Verfügbarkeit von GPS-Signalen verhindert (Siebert und Teizer 2014). Das Kartierungspotenzial wurde Ende der siebziger Jahre verstanden und so wurden Navigations- und Kartensensoren in funkgesteuerte Plattformen integriert. So konnten hochauflösende Bilder aus geringer Höhe generiert werden. Aufgrund der geringen Zahl an Publikationen und Konferenzen kann darauf geschlossen werden, dass diese Technologie anfangs in akademischen Kreisen keinen großen Anklang fand. Die Entwicklung, Anwendung und Regulierung dieser Technologie erfolgte durch Zivilluftfahrtbehörden, welche den sozialen und wirtschaftlichen Nutzen erkannten (Colomina und Molina 2014). Durch die Entwicklung von kostengünstigeren und

leichteren Technologien zur Messung von Ausrichtung und Orientierung, vor allem für Smartphones, konnten Modellflugzeuge und -hubschrauber zu funktionsfähigen UAVs umgebaut werden. Ein vielfältiger Einsatz von UAV wurde durch die Einführung von präzisen GPS- und Gyroskop-Technologien, welche eine verbesserte Leistung, Nutzlast, Ausdauer und Flexibilität mit sich führte, möglich. Aus Sicherheitsgründen ist der kommerzielle Einsatz auf Flüge innerhalb der Sichtlinie (line-of-sight (LOS)) beschränkt. Der Pilot hat permanente Kontrolle und Interaktion für den Fall unvorhergesehener Ereignisse wie andere Flugzeugen in der Nähe oder Umweltbedingungen, die das UAV beeinflussen könnten wie z.B. Wind (Siebert und Teizer 2014). Die weltweit häufigsten gesetzlichen Einschränkungen beziehen sich auf den Sichtflug und eine Flughöhe von maximal 150 Meter über Grund (Toth und Jozkow 2016).

Wesentliche Vorteile von UAVs sind, dass sie in Hochrisikosituationen ohne Gefährdung von Menschenleben sowie in unzugänglichen Gebieten in geringer Höhe nahe am Objekt geflogen werden können. Beispiele von solchen Regionen sind z.B. Naturkatastrophen wie Vulkanausbrüche, Überschwemmungen oder Erdbeben. Auch bei schlechten Wetterverhältnissen, welche keine Befliegung mit bemannten Flugzeugen zulassen, ist eine Datenerfassung mit UAVs möglich. Weitere Vorteile sind die Nichtbelastung durch physiologische Einschränkungen und wirtschaftlichen Kosten menschlicher Piloten, die Fähigkeit zu schneller Datenerfassung und Übertragung der Bild-, Video- und Orientierungsdaten in Echtzeit an die Kontrollstation am Boden. UAVs können auch als Ergänzung oder Ersatz der terrestrischen Photogrammetrie angesehen werden, welche sich auch durch den Kostenfaktor auszeichnen (Eisenbeiß 2009).

Einschränkungen bei der Verwendung von insbesondere Low-Cost-UAVs entstehen durch die begrenzte Sensor-Nutzlast in Gewicht und Dimension. Dadurch müssen sie im Vergleich zu Großformatkameras eine höhere Anzahl von Bildern generieren, um die gleiche Bildabdeckung und vergleichbare Bildauflösung zu erhalten. Die kostengünstigen Sensoren sind in der Regel auch weniger stabil als High-End-Sensoren, was zu einer verminderten Bildqualität führt. Die Nutzlastbegrenzung hat auch zur Folge, dass Navigationsgeräte von geringem Gewicht verwendet und so weniger genaue Ergebnisse für die Orientierung der Sensoren erzielt werden können (Eisenbeiß 2009). Wie bei Toth und Jozkow (2016) erwähnt, sind neben den

technischen Gründen auch häufig rechtliche Grenzen gesetzt. Seit dem 1. April 2014 ist der Betrieb eines ULFZ gesetzlich geregelt (RIS 2016).

Seit dem 31. Dezember 2020 wird das Fliegen von Drohnen mit dem europäischen Drohnen-Regulativ einheitlich geregelt. Der Drohnenbetrieb wird in die Kategorien „Open“, „Specific“ und „Certified“ eingeteilt (Austro Control 2021).

Bei der Kategorie „Open“ gilt es, einen ununterbrochenen Sichtkontakt einzuhalten und maximal 120 Meter über Grund mit einer Drohne nicht schwerer als 25 Kilogramm zu fliegen. Hier muss vor dem Flug keine Bewilligung durch die Austro Control erfolgen, jedoch braucht der Pilot einen Nachweis seiner Kompetenz und muss sich registrieren (Austro Control 2021).

Die Kategorie „Specific“ tritt dann ein, wenn die Vorgaben der „Open“- Kategorie nicht eingehalten werden können. Hierbei sind Flüge außerhalb der Sichtweite mit einer Drohne über 25 Kilogramm oder Flüge mit einer Drohne über 4 Kilogramm über besiedeltem Gebiet erlaubt (Austro Control 2021).

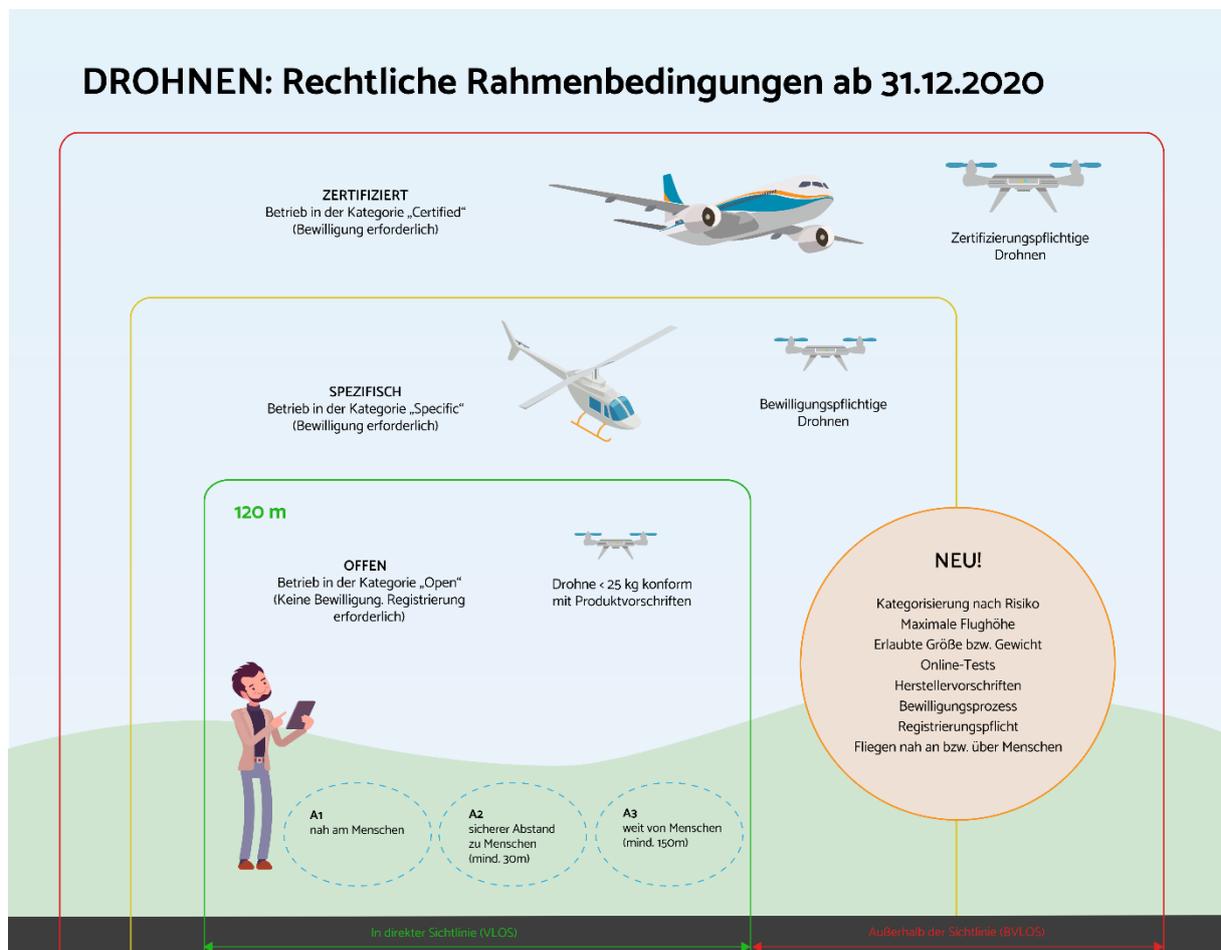


Abbildung 10: EU-Regulativ (Quelle: Austro Control 2021)

Zusätzlich zum Luftfahrtgesetz sind weitere rechtliche Aspekte wie Datenschutzbestimmungen, Zustimmungen von Grundbesitzern, Naturschutz und Sicherheitszonen zu beachten (Austro Control 2020).

Für die Befliegung dieser Arbeit wurde eine Drohne der offenen Klasse A3 verwendet, welche in dauerhafter Sichtverbindung mit dem Piloten stand und die 120m Flughöhe über Grund nicht überschritt. Da das Untersuchungsgebiet im Nationalpark Gesäuse gelegen ist, musste aufgrund des Naturschutzes eine Genehmigung des Nationalparks eingeholt werden, um sicherzugehen, dass keine Felsenbrüter wie Steinadler oder Wanderfalken in der Brutzeit gestört werden.

3.2 SfM – Photogrammetrie

Wie im oberen Kapitel erwähnt, besitzen UAV-Daten spezielle Eigenschaften wie instabile Kamerageometrien, große radiometrische Variationen etc., welche dazu führten, dass diese in klassischen photogrammetrischen Softwarepaketen nur eingeschränkt ausgewertet werden konnten (Schöttl 2017). Structure from Motion ist eine kostengünstige und benutzerfreundliche photogrammetrische Technik für die Gewinnung von hochauflösenden Datensätzen in verschiedenen Maßstäben (Westoby et al. 2012). Nach Westoby et al. (2012) besteht das Grundprinzip der SfM-Methode daraus, 3D- Informationen aus überlappenden (stereoskopischen) Bildern abzuleiten. Die Bildüberlappungen der UAV- Aufnahmen sind meist für die SfM-Methode sehr groß und liegen bei 60-80% (Schöttl 2017).

Die in dieser Arbeit verwendete Software ist Agisoft Metashape Professional. Diese Software ermöglicht die Verarbeitung von RGB- oder Multispektralkamerabildern in die Form von Punktwolken, georeferenzierten Orthomosaiken und digitalen Höhenmodellen. Die Software besitzt einen linearen projektbasierten Workflow, welcher auch für Laien benutzerfreundlich ist. Basierend auf Smith et al. (2016) soll folgende Abbildung 14 einen Überblick über einen typischen SfM-Workflow geben. Inputs und Outputs sind in Orange dargestellt.

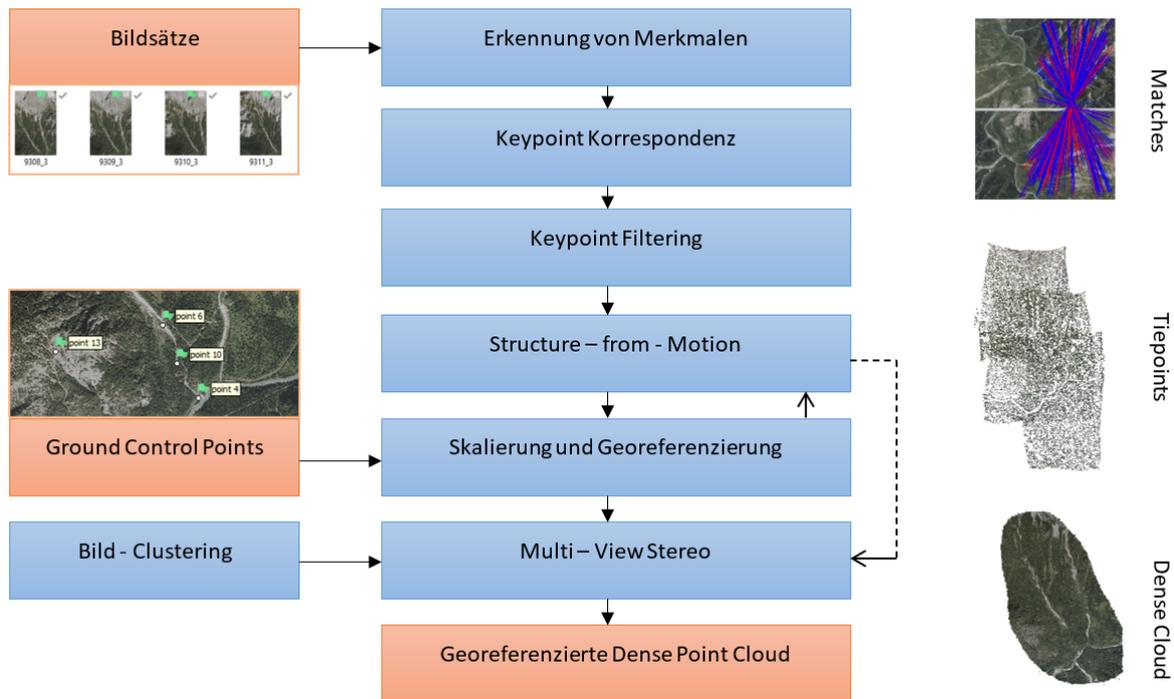


Abbildung 11: Projektbasierter Workflow SfM (eigene Darstellung nach Smith et al. 2016)

Dieser Workflow ist allein stehend von der verwendeten Software als auch von der eingesetzten Aufnahmeplattform, da bei handeltreibenden Softwarepaketen, wie auch der bei dieser Arbeit verwendeten Software, der exakte Workflow nicht bekannt ist. Zum Workflow (siehe Abbildung 11) (Schöttl 2017): In dem ersten Schritt wird in den Bildsätzen nach Merkmalen (Keypoints) gesucht. Daraufhin wird nach korrespondierenden Keypoints zwischen den Bildern gesucht (Feature Matching). Gefundene Matches sind durch Filtern und Prüfen fehlerfrei, da ungenaue Verknüpfungen gelöscht werden. Der SfM- Teil wird durch das Bestimmen der Geometrie (Struktur), der inneren und äußeren Orientierung der Kamera (im Bildraum) bestimmt. Dieser Arbeitsschritt wird in vielen Softwarepaketen für das Bildpaar mit den meisten gefundenen Merkmalen durchgeführt. Anschließend wird Bild für Bild hinzugefügt und erneut berechnet, bis alle Bilder orientiert sind. Die daraus berechneten Punktwolken werden für weitere Auswertungen skaliert, bei UAV-Auswertungen auch georeferenziert (Schöttl 2017, Smith et al. 2016, Westoby et al. 2012). Nach Toth und Joskow (2016) können zur Georeferenzierung der Bilddaten drei Ansätze herangezogen werden: 1) die direkte Referenzierung durch ein GPS-IMU System, 2) die indirekte Referenzierung aufgrund von Tie Points und GCPs und 3) eine Kombination aus 1 und 2 (Schöttl 2017). Für diese Arbeit wurden alle Bilddaten

indirekt georeferenziert. Beim letzten, äußerst rechenintensiven Arbeitsschritt wird die Punktwolke verdichtet. Als Endergebnis wird eine georeferenzierte Punktwolke ausgegeben, aus der Geländemodelle und Orthomosaike erstellt werden können (Schöttl 2017).

3.3 DEM of Difference – Vergleich

Lague et al. (2013) beschreiben den DEM of Difference- Vergleich (DoD) als eine schnelle Methode, um Abweichungen in der Höhe zu ermitteln. Bei dieser Methode werden zu vergleichende DEMs auf einer Pixel-für-Pixel- Basis differenziert, sodass dies einem vertikalen Abstand entspricht. Der Einsatz dieser Methode stößt an seine Grenzen, wenn der Vergleich auf Überhänge oder senkrecht vertikale Strukturen angewendet wird. Grundsätzlich ist es schwierig, komplexe Geländeoberflächen mit einem Rastermodell zu beschreiben, da jedoch die einzelnen Rasterzellen bei beiden Modellen gemittelt werden, bleiben sie vergleichbar (Schürch et al. 2011, Smith et al. 2016). Schöttl (2017) verwendet in seiner Masterarbeit ebenfalls den DoD- Vergleich, um die Veränderungen des Sedimentkörpers seines Untersuchungsgebietes, des Langgriesgrabens, zu definieren. Rascher (2020) setzt die DoD- Methode in seiner Dissertation als Ansatz zur Analyse von Sedimentdynamiken in Bergregionen, speziell im Johnsbachtal, ein.

Für den DoD-Vergleich wurden die Höhenmodelle in ArcGIS 10.7.1 mithilfe von Polygonen auf die jeweiligen Detailgebiete zugeschnitten. Da bei der Prozessierung in Agisoft Metashape die Digital Elevation Models (DEMs) der einzelnen Jahre unterschiedliche Auflösungen aufweisen, mussten die zugeschnittenen DEMs der Detailgebiete zuerst auf das Jahr mit der niedrigsten geometrischen Auflösung geresampled werden, um die Vergleichbarkeit zu geben. Sämtliche Auflösungen wurden daher auf das Jahr 2004 mit 34,6 Zentimeter angeglichen. Anschließend wurden immer aus den darauffolgenden Jahren Differenzen gebildet, wobei das jüngere vom älteren (z.B. siehe Abbildung 12: 2020 minus 2016) abgezogen wurde.

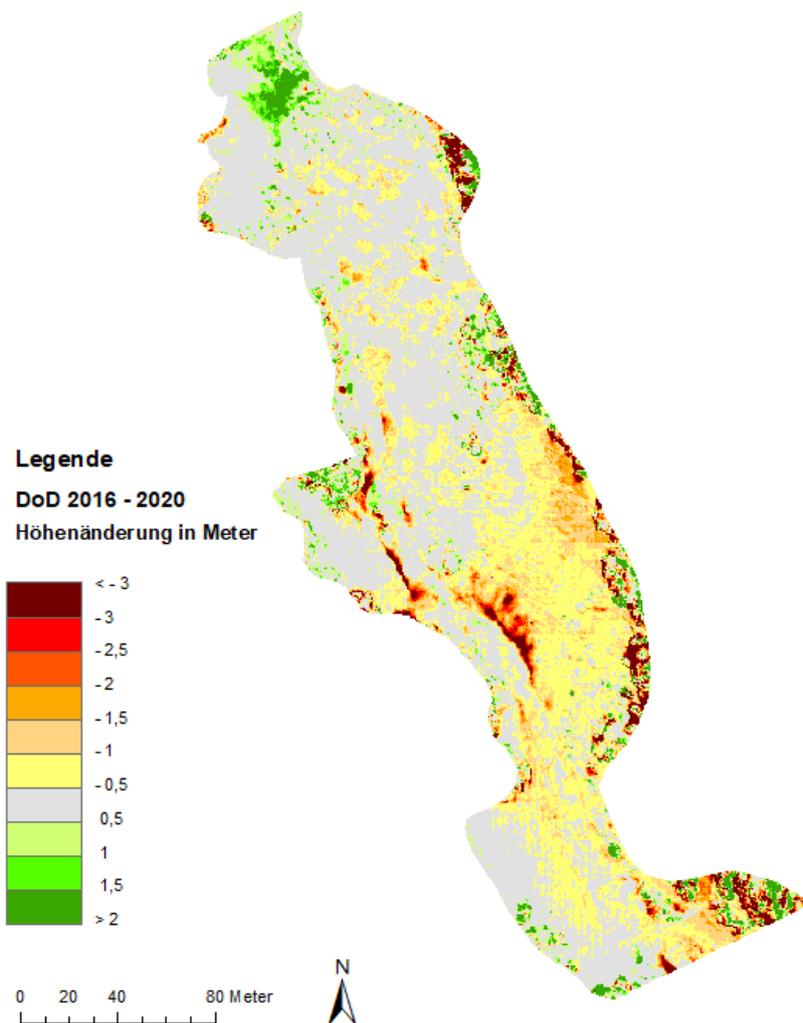


Abbildung 12: DEM of Difference- Vergleich 2016 - 2020 (eigene Darstellung)

Die negativen Differenzen, in Rot dargestellt, bedeuten somit einen Höhenverlust, positive, in Grün dargestellt, eine Höhenzunahme für das jeweilige jüngere Jahr. Die Klasseneinteilung wurde den Veränderungsgrößen der einzelnen Jahre angepasst. Der Wert +/- 0,5 Meter wurde in späteren Darstellungen keiner Farbe zugewiesen, da diese Höhenänderung im Untersuchungsgebiet mit dieser Reliefenergie und in Anbetracht der Zeitabstände der Aufnahmen (siehe Tabelle 1) sowie der Auflösung von 36,4cm als stabil angesehen werden kann.

Die zum Teil extremen Höhenwertänderungen, im positiven wie negativen Bereich, können mit den längeren Messabständen zwischen den Jahren 1954, 1973 und 1997 in Verbindung stehen. Auch die kombinierte manuelle und automatische Georeferenzierung ist ein ausschlaggebender Faktor sowie, dass das

Hauptaugenmerk auf die direkten Graben- und Hangbereiche und nicht auf die umliegenden Waldstücke gelegt wurde.

In der Tabelle 1 werden die unterschiedlichen Abstände der einzelnen Zeitperioden deutlich. Bei den ältesten Aufnahmen sind deutlich längere Abstände zu verzeichnen als bei den jüngeren. Diese langen Abstände lassen auf deutliche Auswirkungen in den Veränderungsanalysen deuten, welche im Kapitel 5.3 und 5.4 weiter beschrieben werden.

Tabelle 1: Abstand der einzelnen Zeitperioden zueinander (eigene Datengrundlage)

Zeitperioden	Abstand in Jahren
2016 - 2020	4
2013 - 2016	3
2004 - 2013	9
1997 - 2004	7
1973 - 1997	24
1954 - 1973	19

3.4 Auswirkungen menschlicher Aktivität

Die landschaftlichen Veränderungen im Nationalpark Gesäuse sowie im Untersuchungsgebiet des Kühgrabens können in natürliche und durch Menschen verursachte unterschieden werden. Gravitative Naturprozesse wie Lawinen und Muren zählen zu den natürlichen, Verbauungen, Kulturtätigkeiten wie der Ausbau von Infrastruktur und Forstwirtschaft zu den durch menschliche Aktivität geprägten. Auch Bewirtschaftungsformen zählen im Nationalpark zu wichtigen menschlichen Aktivitäten, haben aber für den Bereich des Kühgrabens keine große Bedeutung (Höbinger und Kreiner 2017).

Starke Murenereignisse (siehe Kapitel 3.4), wodurch mehrere Hektar Wald überschüttet und die Eisenbahntrasse zerstört wurden, prägen die Geschichte des Kühgrabens. Auf diese Ereignisse folgten die menschlichen Eingriffe durch Verbauungstätigkeiten der Wildbach- und Lawinenverbauung. Dies Eingriffe äußerten sich durch den Einbau von Stahlkonstruktionen und Lebendverbau (Weidezäune etc.) sowie die Umleitung des Grabens durch einen Abweisdamm und den Bau eines Überleitungsbauwerks im Bereich der Gleise. Laut dem Managementplan „Witterschutt und Geschiebe“ von Holzinger et al. (2012) wird das 255 Hektar große Einzugsgebiet Kühgraben – Hüttlgraben in die Problemkategorie 3 eingeordnet. Die betroffene Infrastruktur stellen die Gleiskörper der ÖBB sowie die Forststraßen dar.

Problemkategorie 3 beschreibt Holzinger et al. (2012) so, dass Eingriffe auch abseits der Infrastruktur getätigt werden, dass Verbauungen vorhanden sind sowie die natürliche Dynamik schwer beeinträchtigt bis unterbunden ist. Weiters wird beschrieben, dass die Einhänge im Einzugsgebiet rutschbereit sind und daher die Verbauungen instand gehalten werden müssen. Weitere menschliche Aktivitäten werden ebenfalls vorgeschlagen durch: Wartungen der Hangverbauungen (hier im Detailgebiet 1) und die periodischen Ausbaggerungen am Rauchbodenweg.

Weitere Anliegen sind im Waldmanagementplan des Nationalparks Gesäuse berücksichtigt und fordern, dass in den besonders gefährlichen Grabeneinhängen des Kühgrabens eine standortgemäße Waldbedeckung hergestellt oder erhalten werden muss. Hierbei handelt es sich hauptsächlich um Bestandsumwandlungen von fichtendominierten Wäldern, jedoch Arbeiten in Mischwäldern oder Aufforstungen und Stabilisierungen (Holzinger et al. 2012).

Ein indirekter menschlicher Eingriff erfolgte in den Jahren 2009/2010 durch die Anlage von Dauerbeobachtungsflächen für zoologisch-botanisches Monitoring (Holzinger et al. 2012).

Die Geschiebeerzeugung des Kühgrabens lässt sich aus wirtschaftlicher und technischer Sicht nicht eindämmen. Daher ist das Ziel dieser menschlichen Aktivität, den Ablauf von möglichen Ereignissen möglichst schadlos zu gestalten. Hierzu sollen Teile der Murmassen, vor allem Grob- und Holzteile, ausgefiltert und in geeignete Flächen geleitet werden (Skacel 2013, Zedlacher 1986).

Die Eingriffe in den Nationalpark, welcher grundsätzlich für die Bewahrung des naturgemäßen Zustandes steht, können durch die Gefährdung von Menschen und Infrastruktur und die schon verursachten Schäden gerechtfertigt werden. Da es in diesem Graben ohne bautechnische Maßnahmen zu keiner Eindämmung der Schadwirkung kommen könnte, wurden diese getroffen. Die Forststraße trägt ebenfalls zur Erosion durch Unterschneidung des Hanges bei und bildet somit einen bleibenden negativen Einflussfaktor auf die Prozesse des Grabens. Da die Straße jedoch zur Waldpflege und für das Erreichen des Buchsteinhauses benutzt werden muss, wird dieser Einfluss bewilligt und sie wird auch durch die Schutzbauten besser erhalten.

3.4.1 Sanierungsplan Kühgraben

Am 1. Juli 1979 kam es im Bereich des Kühgrabens zu einem Murgang, welcher starke Erosionsrinnenbildung an der Kegelbasis aufwies. Zu weiteren, außergewöhnlich starken, niederschlagsbedingten Murgängen aus dem Küh- und Rotgraben kam es am 16. August 1979. Im Bereich des Kühgrabens kamen ca. 20.000m³ Geschiebe grabenabwärts ins Tal, welche Gleiskörper zerstörten und der Erzzug fuhr auf die noch in Bewegung befindliche Mure auf (Skacel 2013). 3.000m³ konnten sofort von der Enns abtransportiert werden, die Strecke blieb acht Tage unpassierbar (Skacel 2013, Hasitschka et al. 2014). Weiters wurde der Bahnkörper am 8. August 1980 erneut im Bereich Kühgraben vermurt, wobei ein Personenzug zwischen Mure und einem Geschiebestoß eingeschlossen wurden. Um weitere solche Vorfälle zu vermeiden, wurden von der Wildbach- und Lawinenverbauung zwischen den Jahren 1991 und 2003 Maßnahmen gesetzt (siehe Abbildung 13). Die ersten Verbauungen fanden im unteren Teil des Kühgrabens, im Mündungsbereich in die Enns, statt. 1989 bis 1990 wurde ein Murenüberleitungsbauwerk mit einem 50m Schutzdamm im Bereich der Gleise sowie ein 40m langer Gerinneausbau im Mündungsbereich gebaut. 1990 bis 1991 folgte ein 122m langes Steingerinne, welches auf drei Querwerke aus Beton gestützt ist, mit einem 60m Sicherstrang zur Ableitung von Quellwässern, ein Querwerk im Bereich des bestehenden Forstweges sowie eine Sicherung der bestehenden Felsstufe. Darauffolgend wurden in den Jahren 1991 bis 1992 ein 140m langer Leitdamm mit Abschlusswerk und einer Baustellen- und Räumzufahrt gebaut. Diese Zufahrt verläuft aus gleichem Grund auch über den Rotgraben. In dem Bereich dieser

Verbauungen wurde außerdem Wert auf eine umfassende Begrünung gelegt. Im Kühgraben wurden im oberen Teil in den Jahren 1995 bis 2000 technische und biologische Maßnahmen zur Geschiebeherdbekämpfung, Geschiebebremse und Hangstabilisierung in Form von Eisenpiloten und Hangfußsicherungen sowie Weidenflechtzäune und Holz-Krainer-Wände eingebaut (Skacel 2013, Hasitschka et al. 2014). Gebaute Solstabilisierungen aus Stahlprofilen konnten zu keinem wirkungsvollen Ergebnis führen, da durch die Seitenerosion der Grabenhänge diese wieder freigelegt wurden und somit wirkungslos sind und sogar zu örtlichen Verkläunungen beitragen (Ehrenfellner 2005).

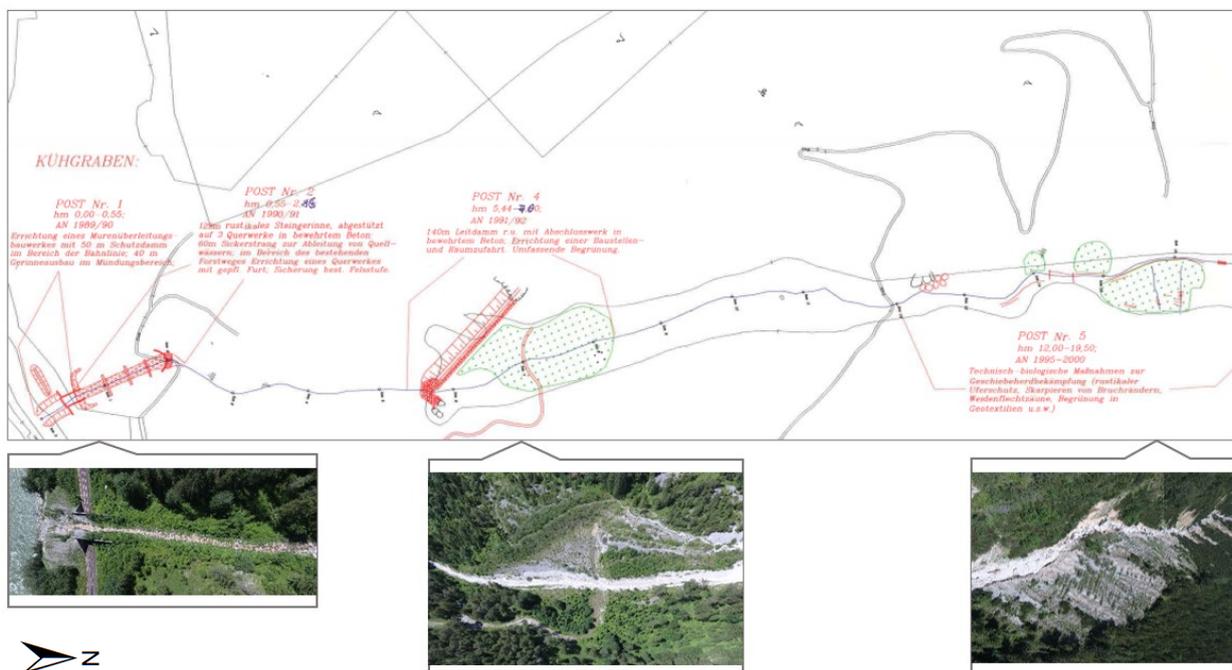


Abbildung 13: Lageplan des Verbauungsprojektes Kühgraben (eigene Darstellung nach Wildbach und Lawinerverbauung 2002)

4. Prozessierung

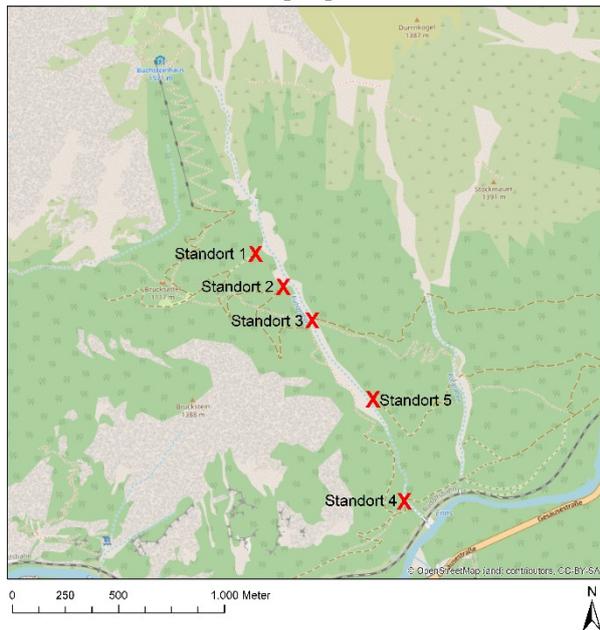
4.1 UAV-Daten

4.1.1 Planung und Erfassung

Vor der Befliegung wurden das Höhenmodell sowie Orthophotos analysiert, um passende Standorte für die Befliegung ausfindig zu machen. Da das Hauptaugenmerk der aufzunehmenden Daten die Erfassung menschlicher Aktivität war, wurden die

Aufnahmestandorte auch so gewählt und der Kühgraben nicht in seiner vollen Länge, sondern erst ab den bautechnischen Maßnahmen im oberen Teil befliegen. Am 08. Juli 2020 wurden die UAV-Daten mit einer DJI Phantom 4- Drohne der Universität Graz bei sonnigem Wetter ohne Niederschlag aufgenommen. Die Befliegung des Grabens wurde auf fünf einzelne Abschnitte aufgeteilt, da die Sichtverbindung zur Drohne sonst nicht gegeben gewesen wäre. Die Standorte konnten über die Forststraße und zu Fuß erreicht werden (siehe Abbildung 14). Der erste Flug hangaufwärts wurde aufgrund zu starker Windverhältnisse abgebrochen und der Bereich vom zweiten Standort aus noch einmal befliegen. Der fünfte Standort wurde zusätzlich hinzugefügt, da eine Unsicherheit bestand, ob dieser Teil ausreichend von Standort drei und vier befliegen werden konnte.

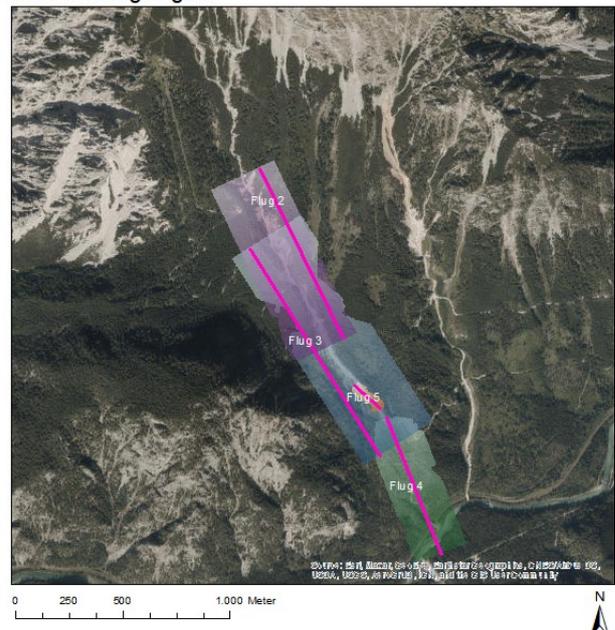
Standorte der UAV-Befliegungen



Legende

X Befliegungsstandorte

UAV-Befliegungen



Legende

Flug	Flug 2	Flug 3	Flug 4	Flug 5
Value	High : 1214,28 Low : 867,725	High : 1043,33 Low : 688,451	High : 785,074 Low : 486,025	High : 806,101 Low : 751,868

Abbildung 14: Standorte und UAV-Befliegungen und Länge sowie Abdeckung der einzelnen Flüge (eigene Darstellung, Datengrundlage: ESRI 2021a)

4.1.2 Prozessierung

Durch die zu starken Windverhältnisse und die Vorauswahl der Bilder des ersten Fluges wurde entschieden, diesen nicht zu prozessieren, da er gänzlich unbrauchbar wäre. Da der gesamte Bereich des fünften Fluges, welcher deutlich weniger Bilder als

die anderen Flüge aufweist, schon durch den dritten abgedeckt wird und durch das Zusammenfügen potenzielle Fehlerquellen in den Schnittbereichen entstehen können, wurde dieser zwar prozessiert, jedoch bei den weiteren Analysen nicht verwendet. Bei allen Flügen wurden die gleichen Einstellungen gewählt:

Tabelle 2: Ergebnisse Prozessierung UAV-Daten (eigene Datengrundlage)

Flug	Bilder	Points	Quality	DEM/Ortho
2	306	396.890	Ultra high	4,47 cm/pix
3	294	481.483	Ultra high	6,24 cm/pix
4	138	227.972	Ultra high	3,8 cm/pix
5	25	39.136	Ultra high	1,28 cm/pix

Wie in der Tabelle 2 zu sehen ist, kann die gesamte Befliegung des Kühgrabens auf eine Auflösung von 6,24cm geresampled werden. Da der zweite Flug mit knapp 850 Metern und der dritte Flug mit knapp 1000 Metern die größten Gebiete abdecken, wurden dort auch deutlich mehr Bilder als im vierten Flug, welcher nur eine Strecke von knapp 500 Metern abdeckt, aufgenommen. Alle Schritte der Teilflüge wurden mit der Qualität „Ultra High“ ausgeführt, um ein möglichst hochauflösendes Ergebnis zu erzielen. Die Einstellung einer höheren Genauigkeit beim „Align“-Prozess bedeutet, genauere Kamerapositionen zu erhalten, eine geringere bedeutet gröbere Kamerapositionen, jedoch in kürzerer Rechenzeit (Agisoft 2015). Um die Rechenzeit in diesem Schritt weiter verringern zu können, ist es wichtig, eine Vorauswahl der Bilder zu treffen und mögliche unbrauchbare zu verwerfen. Die Bildpaar-Vorwahloption kann auch die Geschwindigkeit des Prozesses aufgrund der Auswahl einer Teilmenge von Bildpaaren, die abgeglichen werden soll, erhöhen. Es wurde der Modus der „Generic preselection“ gewählt. Dabei werden die überlappenden Fotopaare durch übereinstimmende Fotos mit geringerer Genauigkeit ausgewählt. Masken mussten bei diesen Aufnahmen nicht verwendet werden. Nach dem aligen werden die berechneten Kamerapositionen sowie die „Sparse“-Punktwolke angezeigt. Falsch positionierte Fotos können entfernt und die Punktwolke kann zugeschnitten werden.

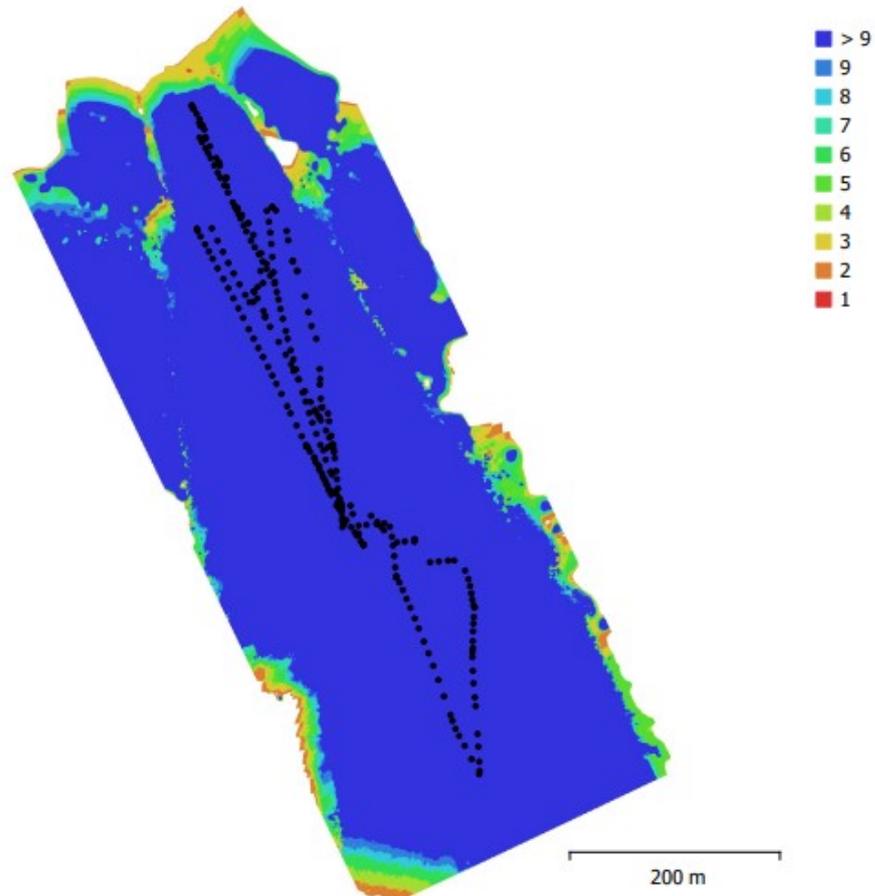


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	306	Camera stations:	306
Flying altitude:	117 m	Tie points:	396,890
Ground resolution:	4.47 cm/pix	Projections:	1,697,947
Coverage area:	0.254 km ²	Reprojection error:	0.711 pix

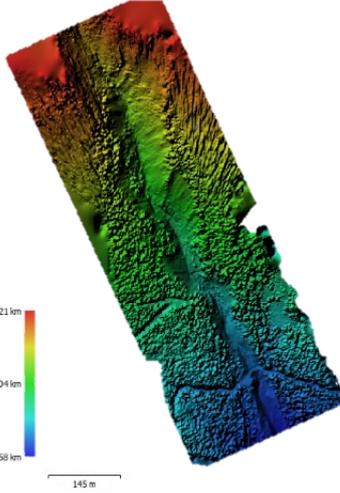
Abbildung 15: Processing Report aus Agisoft Metashape Camera locations und Image overlap (eigene Datengrundlage)

In Abbildung 15 zu sehen ist ein Auszug aus dem Processing Report des zweiten Drohnenfluges. Die hier verwendeten Farben beschreiben die Anzahl der überlappenden Fotos. Es wird deutlich, dass 306 Bilder in einer durchschnittlichen Höhe von 117 Metern (flying altitude) aufgenommen (number of images) und aligned (camera stations) wurden. Dieser Flug deckt eine Fläche von 0,254 km² ab und die „ground resolution“ von 4,47 cm/pix beschreibt die effektive Bodenauflösung, gemittelt über alle ausgerichteten Bilder. Der „reprojection error“ von 0,711 Pixel zeigt die Differenz zwischen der berechneten 3D-Position der Punkte und ihrer markierten

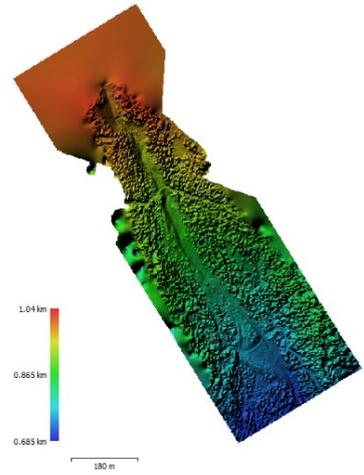
Position auf den Bildern an (Agisoft 2015). Das gesamte Gebiet des Grabens wird von jeweils mehr als 9 Bildern an der jeweiligen Kameraposition abgedeckt. Agisoft gibt die Bildüberlappung in höchstens > 9 Bildern an, darum kann nicht genau definiert werden, wie viele Bilder exakt die jeweiligen Positionen abdecken. Schattenbereiche in den aufgenommenen Bildern sind Bereiche mit großen Unsicherheiten. Die kürzeste Rechenzeit verbuchten die Flüge vier und fünf aufgrund der kleineren Gebiete und geringeren Anzahl an Punkten der Punktwolke.

In der Tabelle 3 unterhalb sind die Ergebnisse der Prozessierung der einzelnen Drohnenflüge in Form der Point Cloud, der Dense Cloud sowie dem DEM dargestellt.

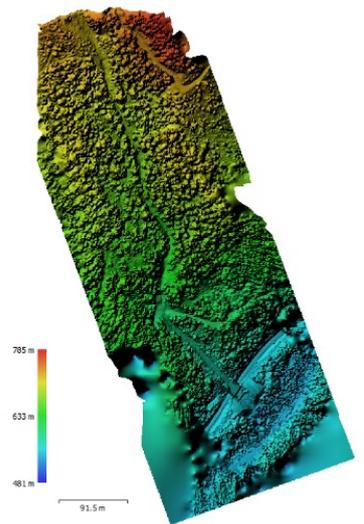
Tabelle 3: Ergebnisse Flüge (eigene Datengrundlage)

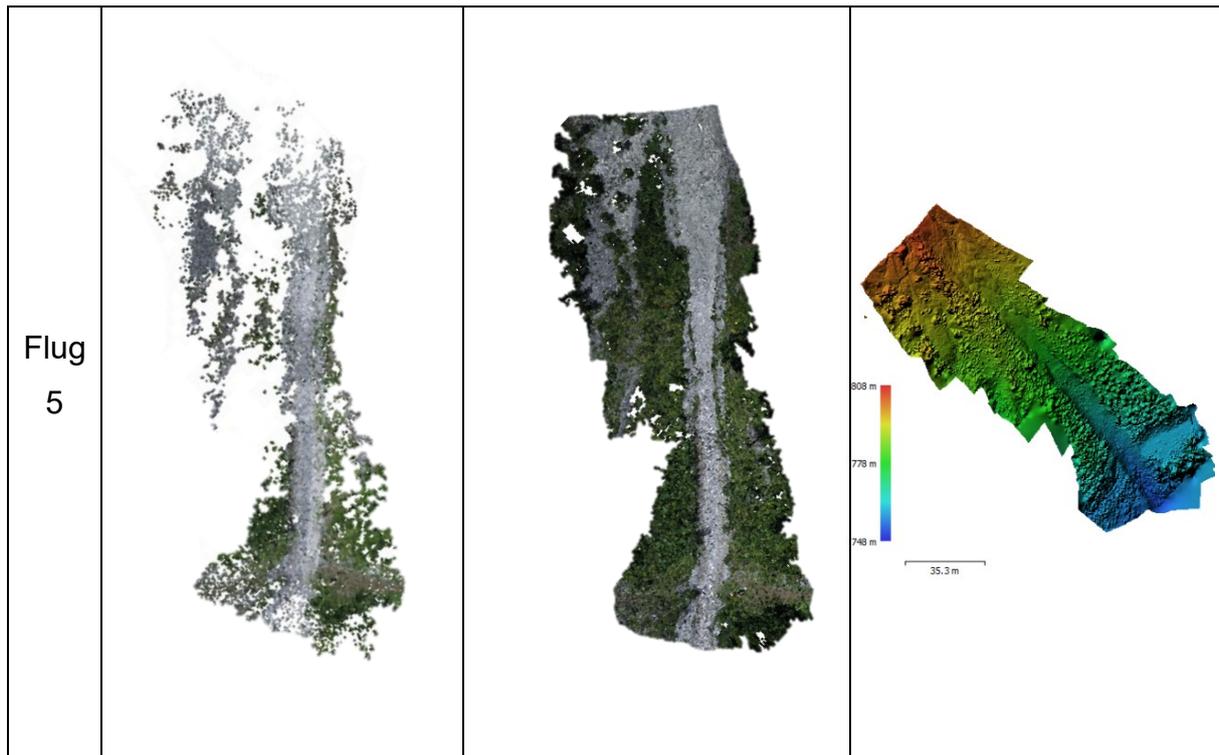
Flug	Point Cloud	Dense Cloud	DEM
Flug 2			

Flug
3



Flug
4





4.2 Historische Luftbilddauswertung

Für die historische Luftbilddauswertung wurden die Jahre 1954, 1961, 1973, 1997, 2004, 2013 und 2016, bereitgestellt vom Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (2021), herangezogen. Bei allen Jahren wurde eine indirekte Referenzierung durch Passpunkte durchgeführt. Diese wurden aus dem Digitalen Atlas Steiermark generiert.

Dazu wurden deutliche Merkmale wie markante Felsen, Straßen oder Bäume, vor allem im und um den Grabenbereichen, aber auch über das gesamte Bild verwendet (siehe Abbildung 16). Bei den Daten von 1954, 1961 und 1973 wurde entschieden, die Referenzmarken auszumaskieren, da falsche Tie Points in den Bildrändern erkannt wurden.

Alle Jahre wurden ebenfalls wie die UAV- Daten mit der höchsten Qualität berechnet. Bei den Jahren 2013 und 2016 wurden die Fotos auf zehn Stück beschränkt, da es sich um hochauflösende UltraCam- Daten handelt. Um die Datengröße der Bilder noch weiter zu minimieren, wurde der Infrarot-Kanal entfernt. Aufgrund der geringen Bildanzahl und deutlich schlechteren Auflösung als die anderen Jahre wurde beschlossen, das Jahr 1961 in die Analysen nicht miteinzubeziehen.

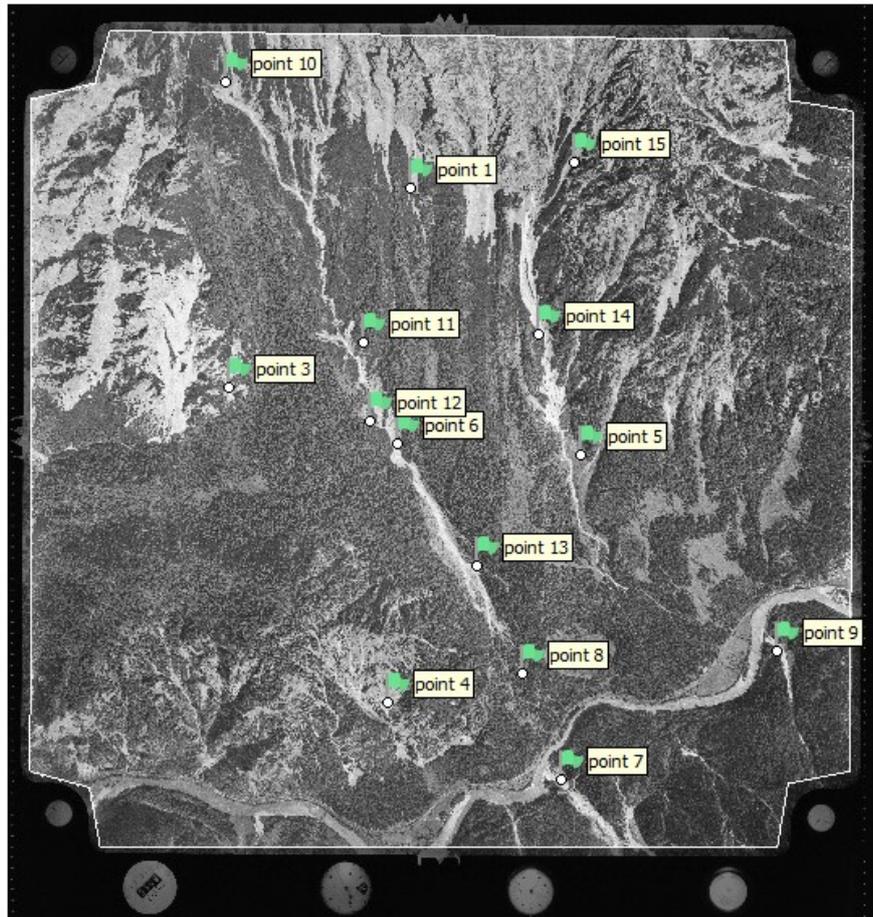


Abbildung 16: Historisches Luftbild 1954 (Quelle: BEV 2021)

Tabelle 4: Prozessierung historischer Luftbilder (eigene Datengrundlage)

Jahr	Bilder	Quality	Marker	DEM/Ortho
1954	8	Ultra High	20	23,6 cm/pix
1961	4	Ultra High	20	43,1 cm/pix
1973	6	Ultra High	20	26,5 cm/pix
1997	10	Ultra High	20	24,7 cm/pix
2004	7	Ultra High	20	34,6 cm/pix
2013	10	Ultra High	15	15,5 cm/pix
2016	10	Ultra High	15	15,4 cm/pix

Für den Schritt der Höhenanalyse wurden alle Jahre auf ihre Detailgebiete (DG) (siehe Abbildung 17) zugeschnitten und durch die Dodo-Methode analysiert. Durch die einzelne Prozessierung der Jahre in Agisoft Metashape und die individuelle indirekte Referenzierung mit Passpunkten entstanden Versätze von mehreren Zentimetern.

Diese Abweichungen wurden durch das Georeferenzieren der, auf die Detailgebiete zugeschnittenen, Orthophotos der Jahre aufeinander deutlich verringert. Die Referenzpunkte wurden gespeichert und auf die gleich zugeschnittenen DEMs angewendet, um deren Versatz ebenso zu verringern.

Beim Georeferenzieren wurde die Anpassungsformation gewählt. Diese beruht auf einer Kombination einer Polynomtransformation und TIN-Interpolation (triangulated irregular network). Diese gewährleistet die höchste lokale Genauigkeit der Passpunkte an die Zielpasspunkte (ESRI 2021b).

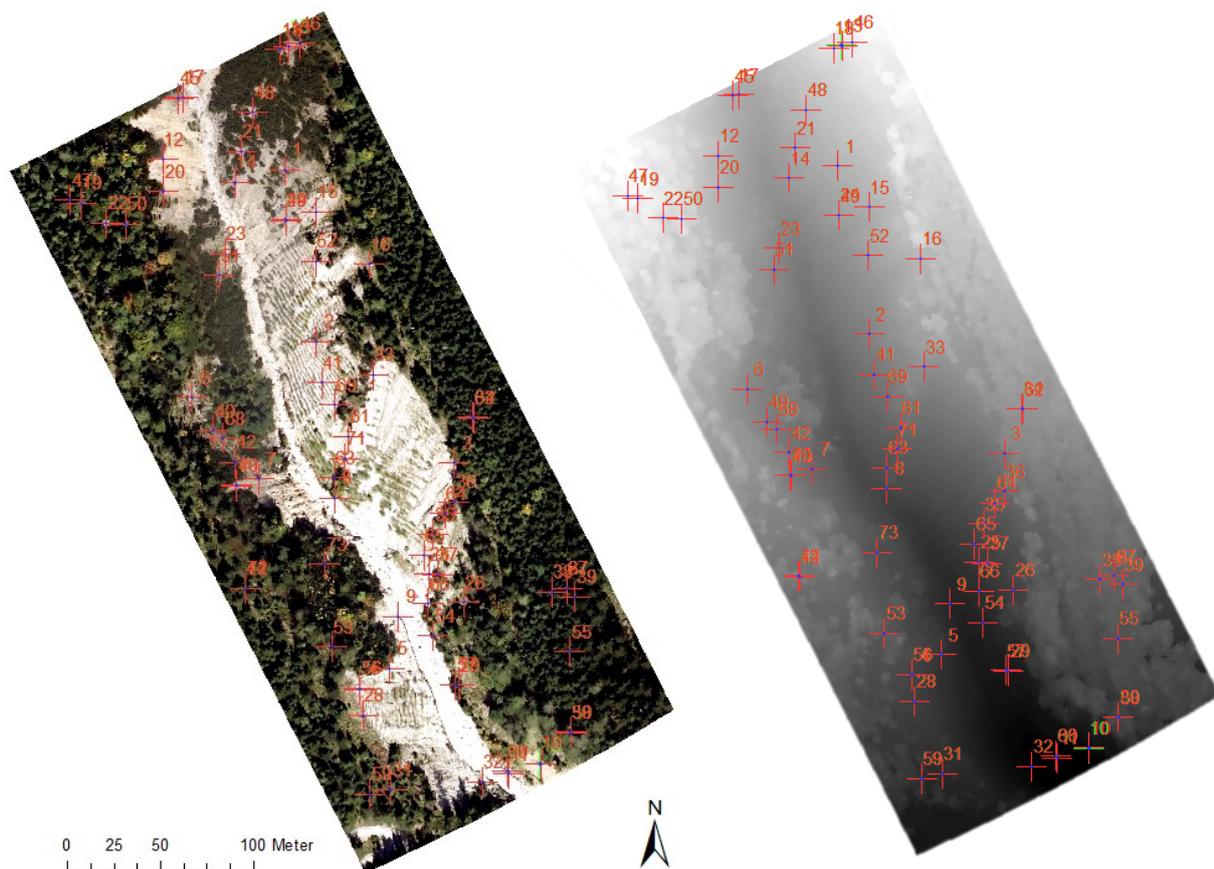


Abbildung 17: Georeferenzierung mittels Passpunkten (eigene Darstellung)

5. Ergebnisse

Die Ergebnisse, welche aus der Datenprozessierung hervorgehen, gliedern sich in die Genauigkeitsanalyse der historischen Luftbildauswertung, den Vergleich zwischen den prozessierten UAV- mit den ALS- Daten, die Detailgebietskartierung sowie den Vergleich von Küh- und Rotgraben.

5.1 Genauigkeitsanalyse

Um eine Aussage über die Genauigkeit der Ergebnisse der historischen Luftbildauswertung treffen zu können, wurden diese mit den ALS-Daten von 2010

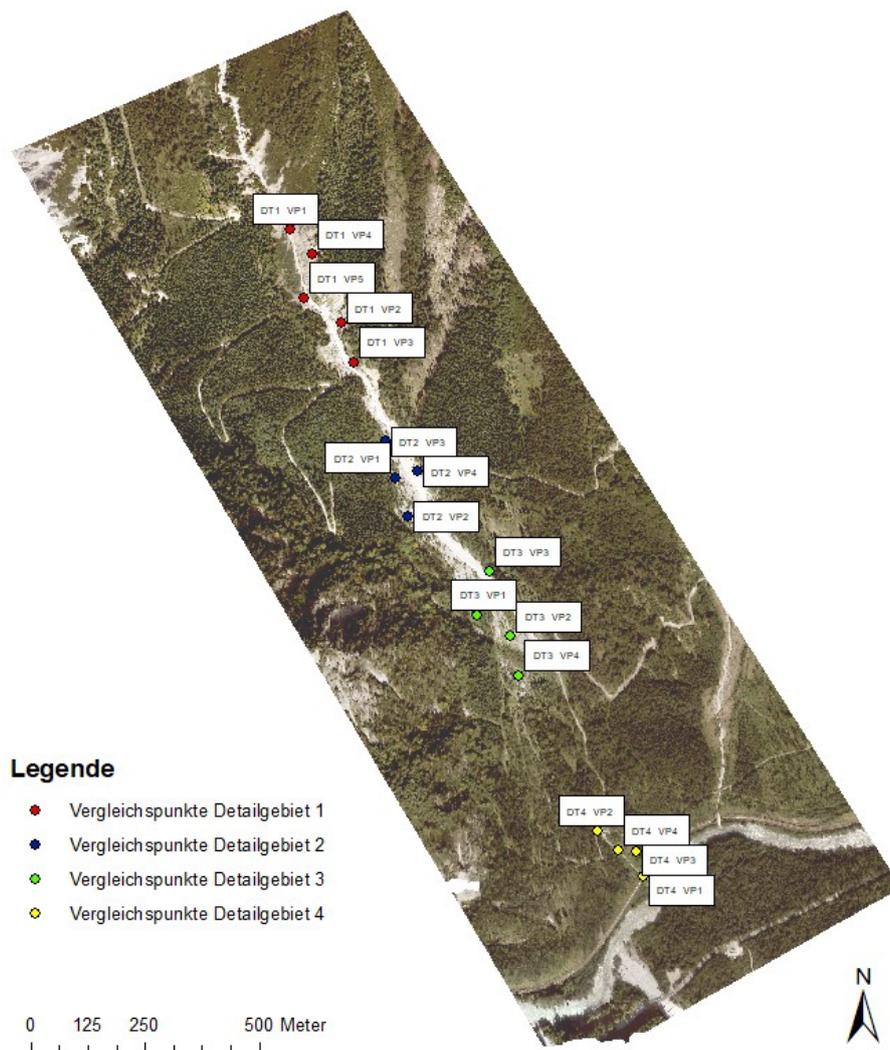


Abbildung 18: Vergleichspunkte für die Genauigkeitsanalyse (eigene Darstellung)

verglichen. Hierzu wurden Vergleichspunkte in allen vier Detailgebieten definiert (siehe Abbildung 18).

Dadurch, dass keine GPS-Punkte im Feld aufgenommen, sondern mit dem Digitalen Atlas Österreich die jeweiligen Daten referenziert wurden, entstehen in diesem ersten Schritt durch den vorgegebenen Maßstab bereits Ungenauigkeiten.

Es wurden Punkte ausgewählt, bei denen davon ausgegangen werden kann, dass sie sich zwischen den Jahren 1954 und 2016 wenig in der Höhe verändert haben, wie z.B. große Felsbrocken. Das Jahr 2020 wird, da es sich in diesem Fall um selbst aufgenommene UAV-Aufnahmen und keine historischen Luftbilder handelt, separat im Kapitel 5.2 auf seine Genauigkeit überprüft. Falls über die Jahre keine gleichbleibenden Stellen im Grabenbereich erkennbar waren, wurden Büsche oder Bäume für den Vergleich herangezogen. Dies beinhaltet, dass sie durch ihr Wachstum an Höhe gewinnen können und so die Genauigkeit der Daten dadurch abweichen kann. Dies betrifft die Punkte DT1_VP1, VP2 und VP3, DT2_VP1 und VP2, DT3_VP3 und VP4 sowie DT4_VP3.

Wie in der Darstellung 19 zu sehen, wurde die Genauigkeit der Vergleichspunkte der prozessierten Jahre im Vergleich zum offiziellen ALS von 2010 (zu sehen in schwarz) dargestellt. Was auffällt ist, dass, je weiter der Abstand zu 2010 ist, sich die Genauigkeit der Daten verschlechtert. Die Daten von 1954 oder 1973 weichen in jedem Detailgebiet am weitesten von den Referenzdaten ab. Im ersten Detailgebiet weichen die Daten durchschnittlich 1,18 Meter, im zweiten 1 Meter, im dritten 1,7 Meter und im vierten 4,1 Meter ab. Die hohe Ungenauigkeit im vierten Detailgebiet lässt sich dadurch erklären, dass, wie in Kapitel 5.3.4 erklärt wird, für die Jahre 1973 und 1997 zu wenig Bilder vorhanden sind, um das Untersuchungsgebiet 4 ausreichend abzudecken, um genaue Ergebnisse erzielen zu können.

Im Detailgebiet 1 ist auffällig, dass das Jahr 1954 in allen Vergleichspunkten größere Höhenwerte im Vergleich zum Referenzjahr 2010 aufweist, was sich in den übrigen Detailgebieten nicht so deutlich herausfiltern lässt. Abgesehen von diesem Jahr liegen die Werte der Jahre des ersten, zweiten und dritten Detailgebiets knapp um den des Referenzjahres. Im Detailgebiet 4 wird, wie oben beschrieben, der Mangel an Daten und die schwierige Georeferenzierung durch wenig gleichbleibende Stellen deutlich.

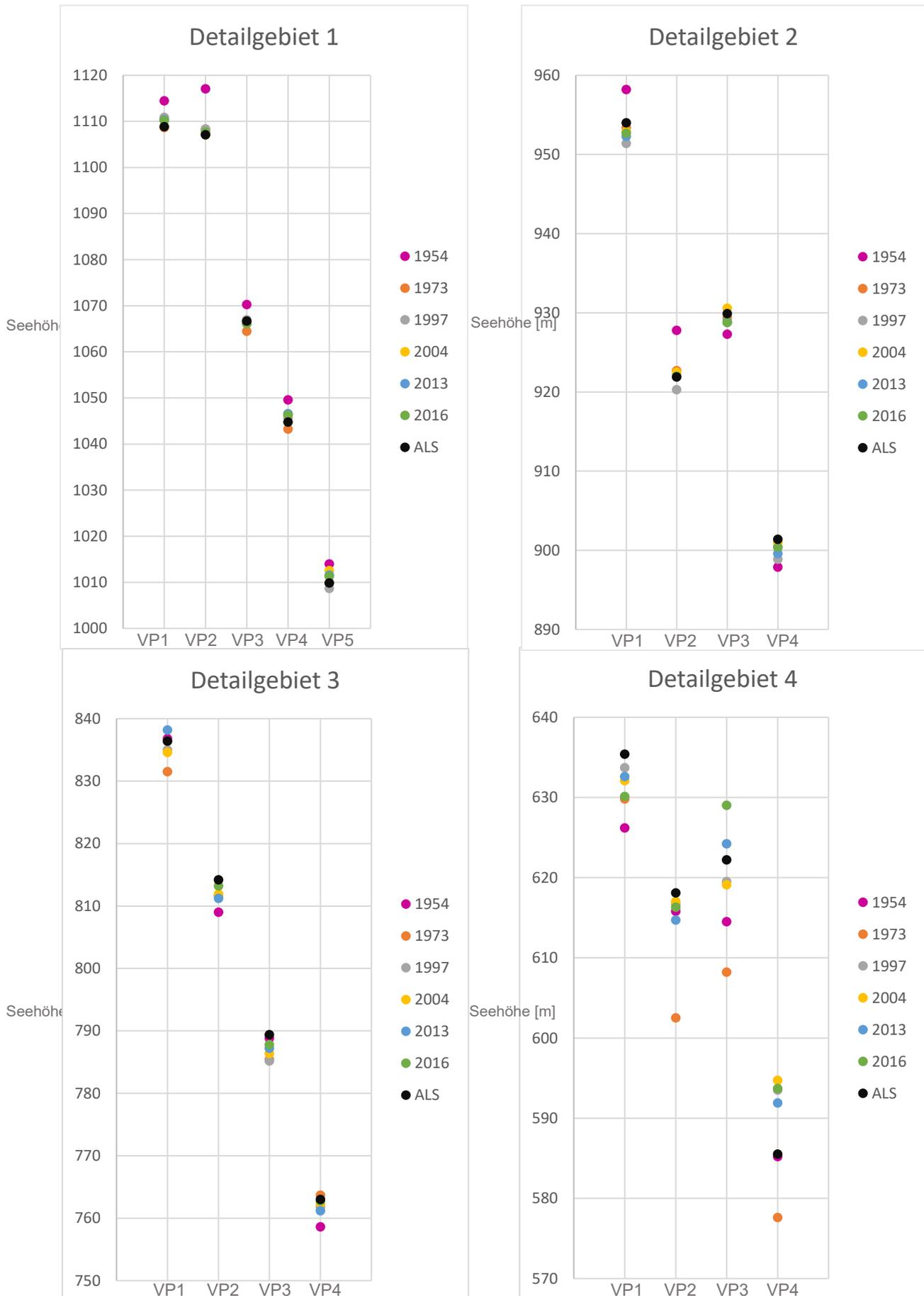


Abbildung 19: Darstellung Abweichung Vergleichspunkte 1954 - 2016 von ALS von 2010 (eigene Darstellung)

5.2 UAV – ALS Vergleich

Um einen Vergleich zwischen Unmanned Aerial Vehicle (UAV)- und Airborne Laser Scanning (ALS)- Daten zu ziehen, wurden die selbst aufgenommenen UAV- Daten des Kühgrabens vom 8. Juli 2020 mit den ALS- Daten des Landes Steiermark vom 7. Mai sowie dem 13. Juli 2010 verglichen (siehe Abbildung 20). Die ALS- Daten wurden in einer Auflösung von einem Meter von der Firma AVT/Milan in einer Flughöhe von 1695m mit einer Höhengenaugigkeit von +/- 15cm aufgenommen. Die Lagegenauigkeit der Aufnahmen beträgt +/- 40cm (Digitaler Atlas Steiermark 2021a).

Es wurde das Höhenmodell der UAV- Aufnahmen auf die Auflösung von einem Meter des Höhenmodells der ALS- Daten geresampled und anschließend mit diesem durch das Auswählen von sieben Punkten verglichen. Die sieben Vergleichspunkte wurden so gewählt, dass sie auf Straßen, großen, unbeweglichen Steinen oder fixen Verbauungen liegen, damit Differenzen in der Höhe, die durch gewisse Faktoren wie Muren, Lawinen, Starkniederschlagsereignisse, Waldschlägerungen oder Sedimentverfrachtungen über die Jahre beeinflusst werden, minimiert werden können. Vergleichspunkt 1 und 2 liegen innerhalb von Hangbereichen ohne Verbauungen auf der Mitte großer Felsen, welche keine Lageänderung zwischen den Jahren 1954 und 2020 erfahren haben. Die Vergleichspunkte 3, 4, 6 und 7 wurden in der Mitte der Forststraße gelegt, da diese in den ausgewählten Bereichen ebenfalls nicht verbaut beziehungsweise stark höhenverändert wurden. Vergleichspunkt 5 befindet sich direkt im Grabenbereich auf einem Wanderweg. Bei diesem Vergleichspunkt ist mit den größten Abweichungen im Vergleich zu den anderen Punkten zu rechnen, da dieser Bereich zwar auf den Fotos dauerhaft erkennbar ist, jedoch im Grabenbereich liegt und somit unter den meisten höhenbeeinflussenden Faktoren steht. Der achte Vergleichspunkt liegt auf der Begrenzung des Überleitungsbauwerks am Fuße des Kühgrabens. Dies sollte einer der stabilsten Vergleichspunkte sein, wobei die im oberen Kapitel erschwerte und ungenaue Prozessierung dieses Gebiets zu stärkeren Abweichungen führen kann.

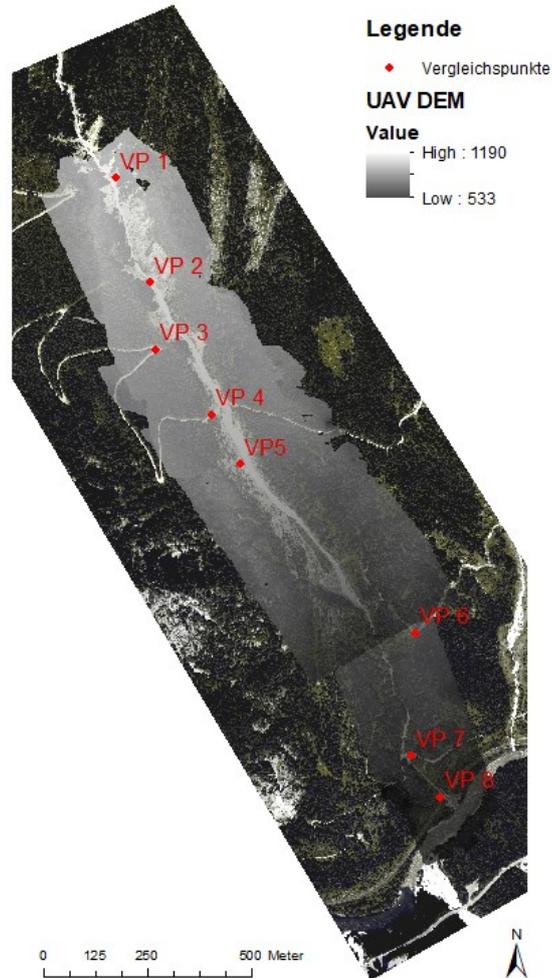


Abbildung 20: Vergleichspunkte UAV mit TLS Vergleich (eigene Darstellung)

Wie in der Tabelle 5 unterhalb zu sehen, beträgt die Spanne der Differenzen 8 Meter. Die Vergleichspunkte 1 (Stein) und 3 (Forststraße) sind jene mit den geringsten Abweichungen. Die Vergleichspunkte auf den anderen Forststraßen (4,6,7) können durch Waldarbeiten und Benutzung menschlich beeinflusst worden sein. Der vierte Vergleichspunkt liegt auf dem Abschnitt der Forststraße, welcher, wie in den Analysen im oberen Kapitel beschrieben, der meisten Pflege und Sanierung bedarf. Dadurch lässt sich die positive Differenz erklären. Der Vergleichspunkt 5 sticht mit seiner deutlichen Abweichung heraus. Da dieser Punkt direkt im Grabenbereich auf einem, von Veränderungen nicht direkt ausgeschlossenem Punkt liegt, können die Prozesse der dazwischenliegenden zehn Jahre eine Höhendifferenz in diesem Bereich mitbeeinflusst haben. Die Differenz des achten Vergleichspunktes kann, wie oben beschrieben, durch die Ungenauigkeiten in der Prozessierung begründet werden.

Tabelle 5: Vergleichspunkte UAV - ALS Vergleich (eigene Datengrundlage)

Vergleichspunkte	Merkmal	UAV DEM	ALS DEM	Differenz in m
VP 1	Felsen	1136,0	1136,3	-0,3
VP 2	Felsen	1042,0	1043,5	-1,5
VP 3	Forststraße	1019,0	1019,3	-0,3
VP 4	Forststraße	945,0	942,7	2,3
VP 5	Wanderweg	907,0	902,0	5
VP 6	Forststraße	760,0	761,0	-1
VP 7	Forststraße	633,0	636,0	-3
VP 8	Bauwerk	592,0	593,0	-1

5.3 Dem of Difference (DoD)

Die DoD-Methode wurde für die einzelnen Jahre auf die Detailgebiete angewendet und die Ergebnisse wurden auf Zusammenhänge mit menschlicher Aktivität untersucht. Zur besseren Interpretation der Ergebnisse der Höhenanalyse wurden die Orthophotos der einzelnen Jahre herangezogen, um Höhenänderungen durch erkennbare Veränderungen in den Orthophotos beschreiben zu können. Für das Thema relevante Zeitperioden werden anschließend genauer beschrieben. Allgemein sind die Bereiche in den Detailgebieten, welche mit „A“ gekennzeichnet wurden, Bereiche mit Höhenverlusten, Bereiche mit „B“ mit Höhengewinn.

5.3.1 DoD – DG 1

Im ersten Detailgebiet wurden in den Jahren 1995 bis 2000 ingenieurbiologische Maßnahmen gesetzt. Diese Änderungen können in den Höhenänderungsanalysen der Jahre 1973 zu 1997 und 1997 zu 2004 erkannt werden. In der Höhenänderungsanalyse der Graben- und Hangbereiche des ersten Detailgebietes der Jahre 1973 auf 1997 wird deutlich, dass im Bereich B1 ingenieurbiologische

Maßnahmen in Form von Weideflechtzäunen gesetzt wurden. Diese sind durch Höhengewinne von bis zu 2m in Abbildung 21 ersichtlich.

Im angrenzenden Bereich A1 wurden teilweise Bäume entfernt, um eine größere Fläche durch Lebendverbauungen stabilisieren zu können. Diese sorgen für eine bessere Hangstabilisierung und wirken dem Hangrutsch entgegen. Dadurch ist in diesem Bereich eine negative Höhenbilanz ersichtlich. Ebenfalls deutlich negative Änderungen sind in den Bereichen A2, A3 und A4 zu verzeichnen, welche durch weiteres Abbrechen der Geländekanten begründet werden können.

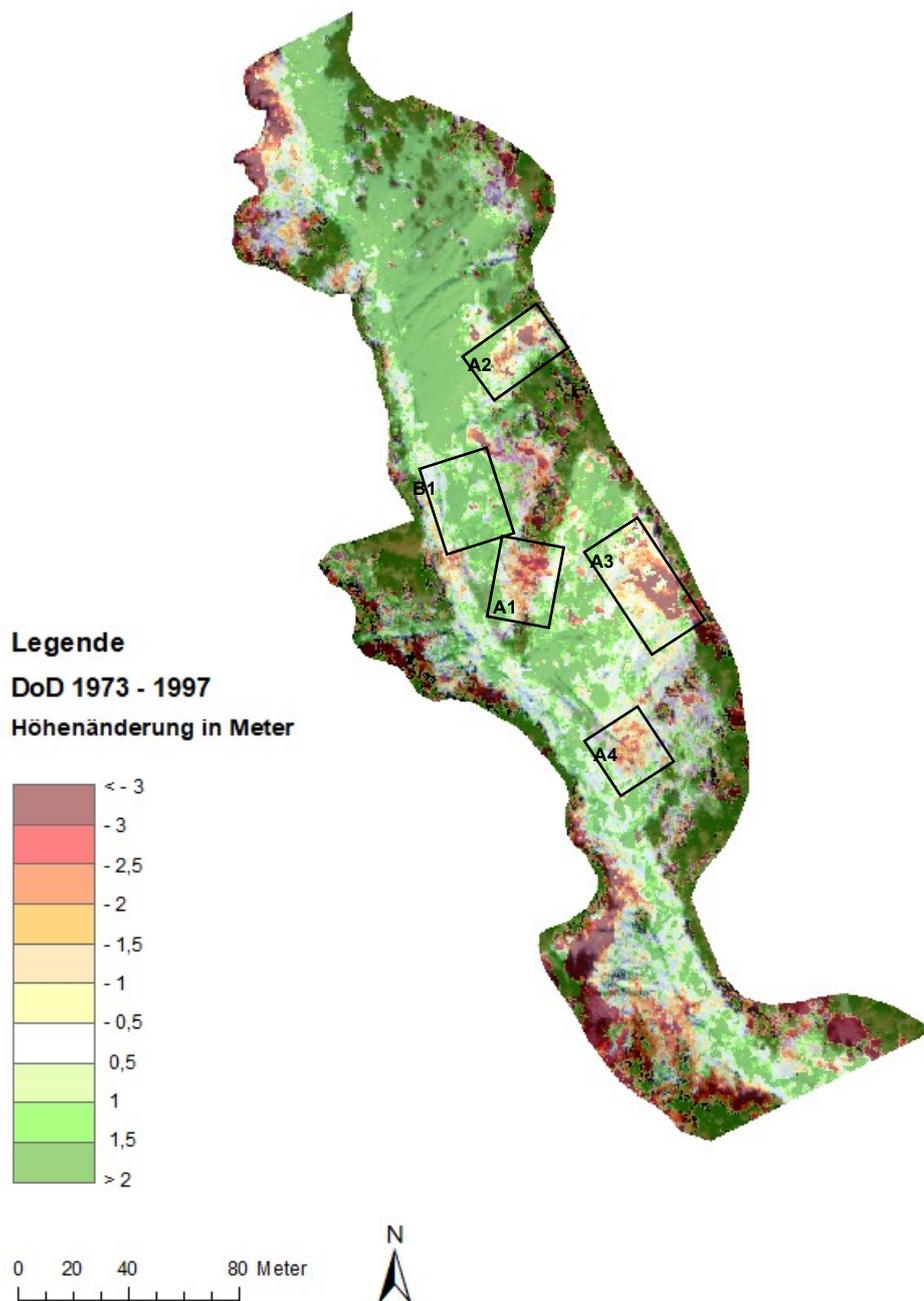


Abbildung 21: DoD 1973-1997 DG1(eigene Darstellung)

Bei allen weiteren deutlich negativen Höhenänderungen können ebenfalls Änderungen im Baumbestand verzeichnet werden. Die Zunahme an Höhe kann durch das Wachsen des Baumbestandes sowie den Schutteintrag an den Hangbereichen erklärt werden. Im Grabenbereich selbst sind die Höhenänderungen in diesem Zeitraum gering.

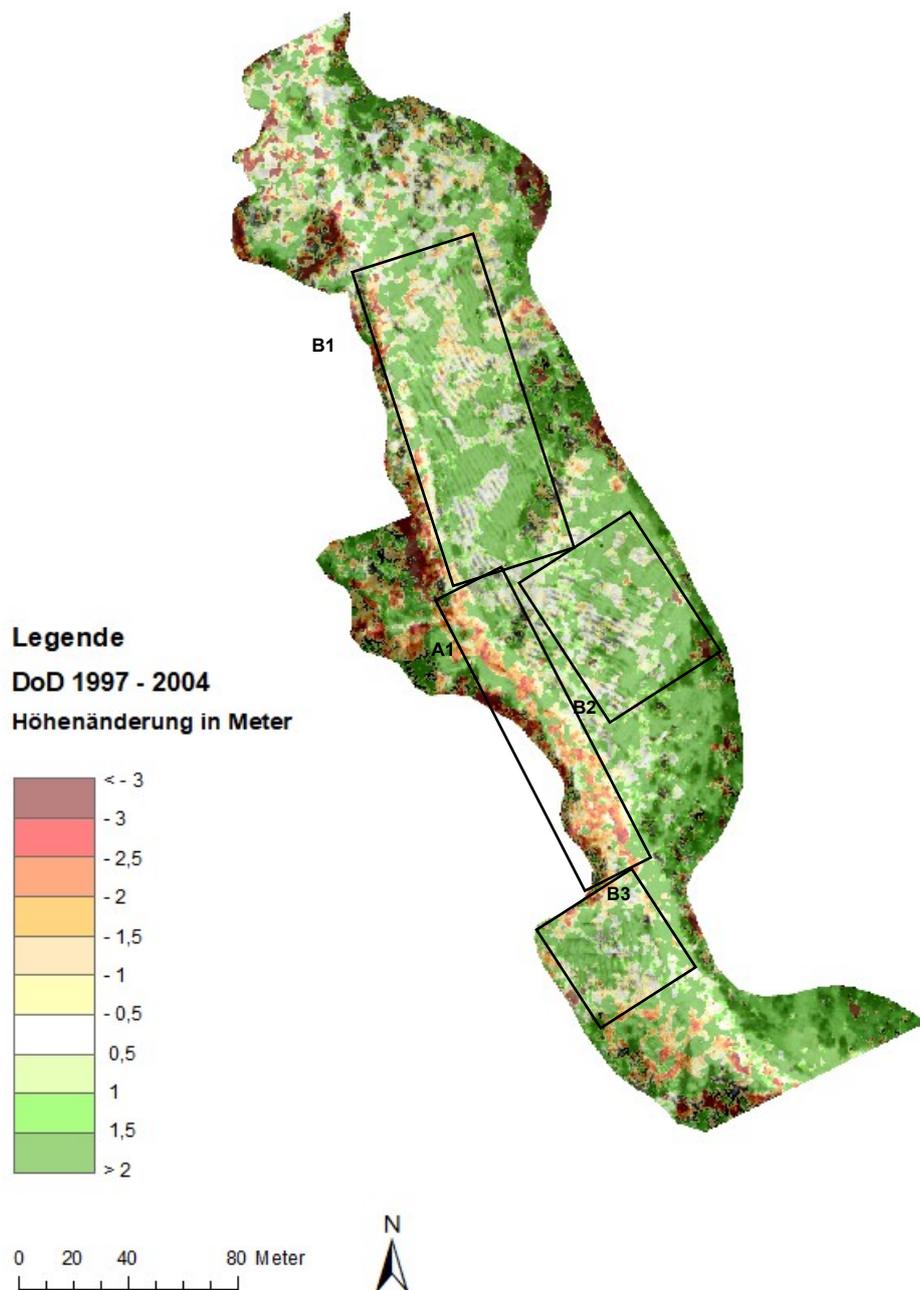


Abbildung 22: DoD 1997-2004 DG1 (eigene Darstellung)

In den Jahren von 1997 auf 2004 wurden weitere ingenieurbiologische Maßnahmen in den Bereichen B1 bis B3 gesetzt, welche die positive Höhenänderungen erklären. Im

südlichen Bereich B1 in der Abbildung 22 sind die oben genannten Weideflechtzäune als Bereiche mit Höhenzuwachs ersichtlich.

In diesem Zeitraum ist, im Vergleich zu der untersuchten Zeitperiode davor, eine Höhenveränderung, meist im negativen Bereich (A1), des Grabenbereichs zu erkennen. Deutliche positive und negative Entwicklungen außerhalb des Grabens und der Hangbereiche sind in dieser Zeitperiode abermals auf die Veränderung des Baumbestandes zurückzuführen.

Die deutlichen Höhenveränderung der Jahre 2013 auf 2016 beschränken sich hauptsächlich auf die Grabenbereiche sowie Hangbereiche ohne bauliche Maßnahmen. Die Bereiche, an welchen ingenieurbioologische Maßnahmen angebracht wurden (Bereiche B1 und B2 der Abbildung 23), zeigen nun bereits eine deutlich stabilere Hangsituation. Zwischen den einzelnen Zaunreihen ist noch vereinzelt ein Abtrag zu verzeichnen, der durch leichtes Nachrutschen begründet werden kann. Die deutlich negativen Entwicklungen in den Bereiche A1-3 sind auf das Abbrechen von Hangbereichen zurückzuführen. Diese Abbrüche haben ebenfalls zur Folge, dass früher bestehende Vegetation in diesem Bereich mitgerissen wird und so die negativen Höhenänderungen mitbeeinflusst wird. Die positiven Änderungen der Bereiche B1 und B2 sind am wahrscheinlichsten durch den Geschiebetransport grabenabwärts und durch mögliches früher beginnendes Abbrechen der Hangbereiche A2 und A3 zu erklären, da drei Jahre zwischen den Aufnahmezeitpunkten liegen.

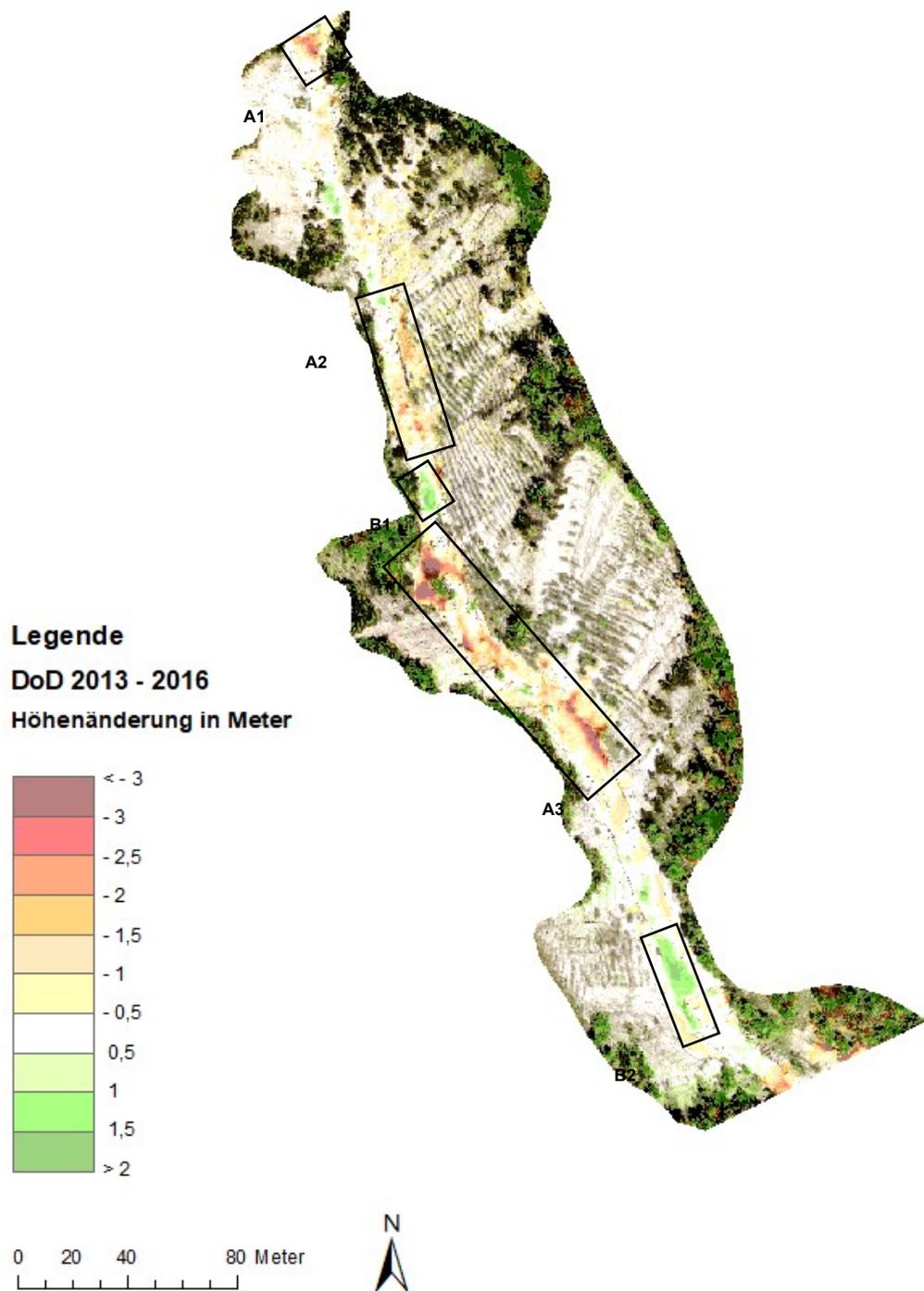


Abbildung 23: DoD 2013-2016 DG1 (eigene Darstellung)

In Abbildung 24 wurden die beiden verglichenen Jahre mit unterschiedlichen Systemen aufgenommen. Die Daten von 2016 wurden durch eine Befliegung mittels eines Flugzeuges, die von 2020 mittels einer Drohne aufgenommen. In den Jahren von 2016 auf 2020 sind vor allem vier Bereiche auffällig. Der Bereich B1 zeigt eine Zunahme in der Höhe durch Zunahme an Vegetation. In den Bereichen von A1-3 ist

das Gegenteil der Fall. Hier wurde Vegetation durch das Abbrechen der Hangbereiche wiederum mitgerissen und entfernt. Der Bereich von A2 verzeichnet ebenfalls eine Höhenänderung durch Abbrechen, jedoch ohne Beeinflussung der Vegetation. Ebenfalls kann allgemein angemerkt werden, dass die baulich veränderten Hangbereiche nun deutlich stabilisiert wurden und teilweise sogar eine positive Höhenänderung erzielt, werden konnte.

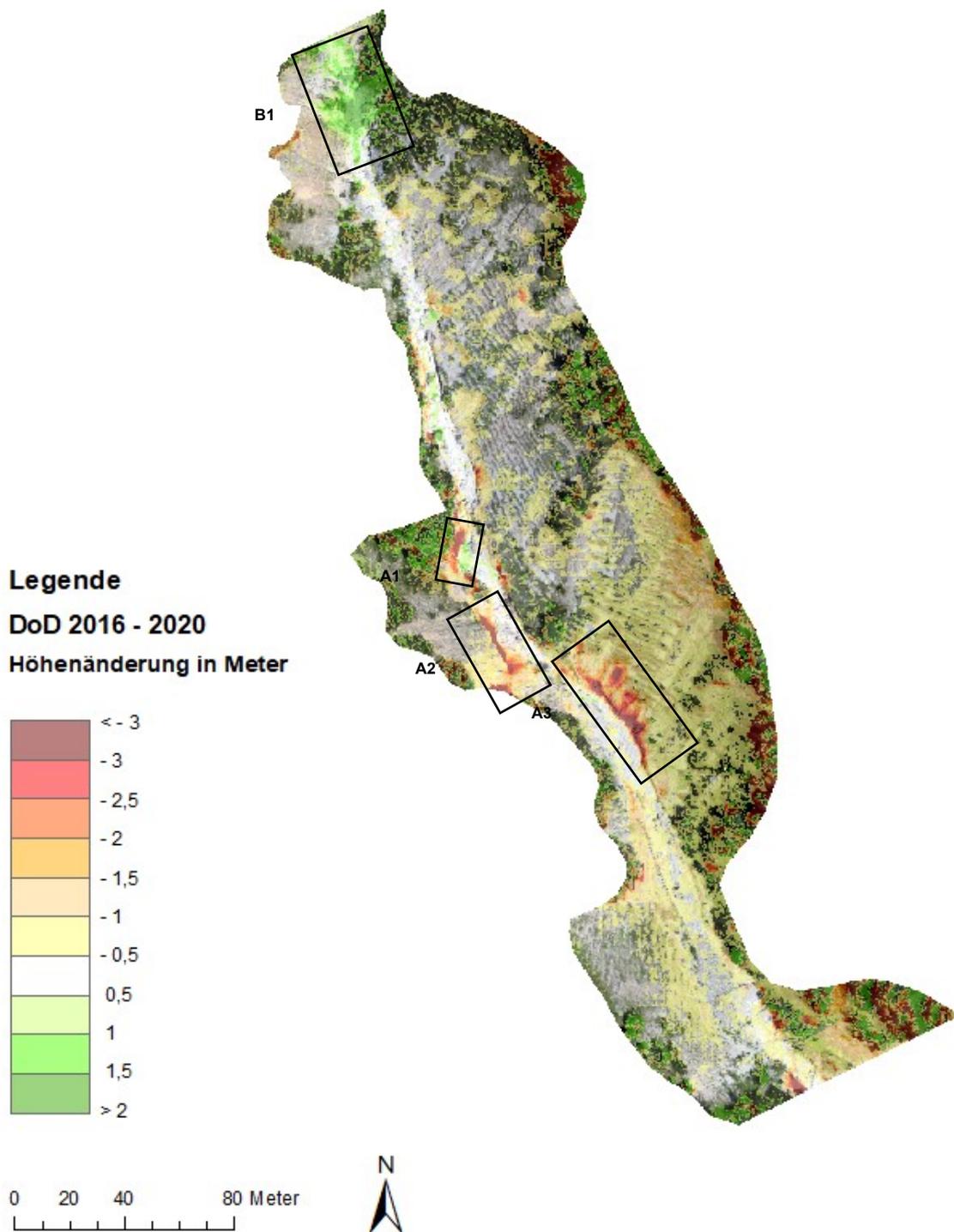


Abbildung 24: DoD 2016-2020 DG1 (eigene Darstellung)

5.3.2 DoD – DG 2

Das zweite Detailgebiet wurde aufgrund der den Graben querenden Forststraße, welche Ausdruck menschlicher Aktivität ist, gewählt. Da in den Jahren zwischen 1995 und 2000 im ersten Detailgebiet ingenieurbioologische Maßnahmen gesetzt wurden, ist dieser Zeitraum auch für die Analyse der Höhenänderungen im zweiten Detailgebiet interessant, da dieses ebenfalls deutliche Änderungen verzeichnet. Wie in den Ausschnitten der Orthophotos auf der rechten Seite der Grafik zu erkennen ist, fanden im Bereich A1 deutliche Schuttverlagerungen im Grabenbereich statt. Diese Verlagerungen und Abrisse führten auch dazu, dass die dort beständige Vegetation mitgerissen wurde, ausgenommen die deutlich positive Veränderung im Bereich A1 innerhalb des Grabenbereichs. Dieser verzeichnet statt dem Abtrag das Anwachsen einer Buschvegetation.

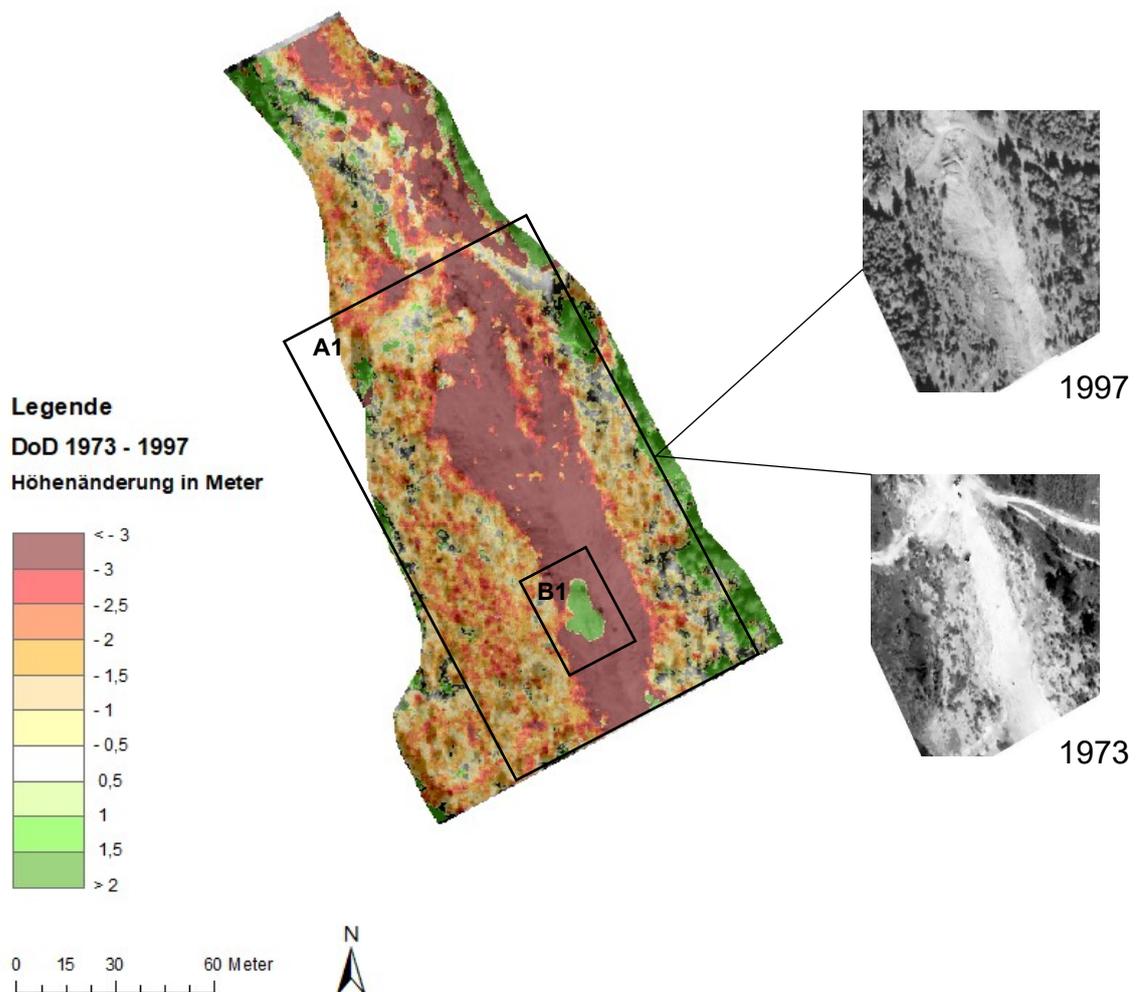


Abbildung 25: DoD 1973-1997 DG2 (eigene Darstellung)

Positive Änderungen des umliegenden Waldes können durch das Wachsen der Bäume begründet werden, aber sind in dieser Arbeit nicht Hauptaugenmerk der Detailgebiete. Dieses Detailgebiet dient auch als Beispiel für die deutlichen Höhenänderungen ohne bauliche Eingriffe. Höhenmaxima von ein bis zwei Metern in den Hangbereichen und von über drei Metern im gesamten Grabenbereich sind keine Seltenheit, auch wenn die Zeitperiode 24 Jahre beträgt.

In den Jahren von 2004 auf 2013 beschränken sich die starken negativen Höhenänderungen auf die tiefsten Stellen des Grabenbereiches (A1 und A2). Dort kanalisiert sich der Schutttransport und schützt die umliegenden Bereiche vor starken Veränderungen.

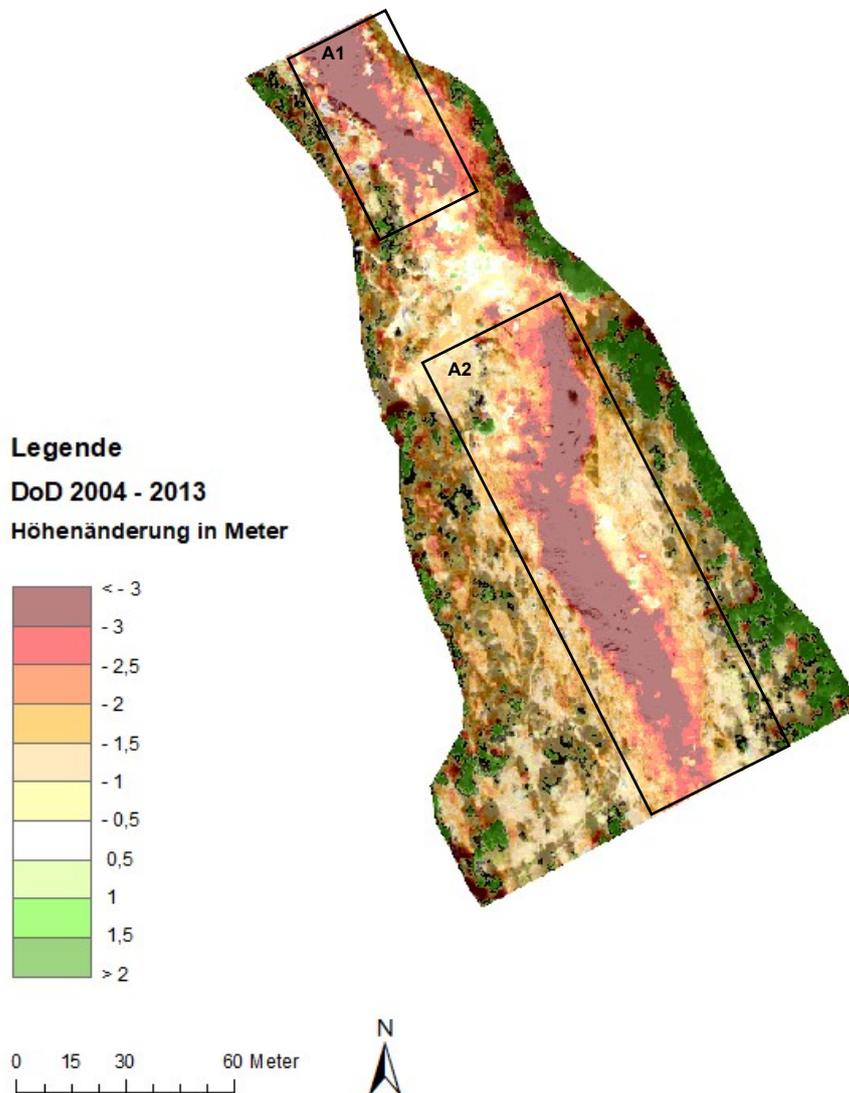


Abbildung 26: DoD 2004-2013 DG2 (eigene Darstellung)

Auch sind trotz des geringeren Zeitraums wiederum Höhenverluste von größer drei Metern zu verzeichnen. Der Straßenbereich innerhalb des Grabens ist deutlich weniger von Höhenänderungen betroffen als die Bereiche außerhalb. Dies könnte im Zusammenhang mit der Rodung des Waldes oberhalb der Forststraße stehen. Die Forststraße könnte von höherer Bedeutung und somit besonders schützenswert für Land- und Forstwirtschaft in diesem Bereich sein und sollte deshalb ständig ausgebessert werden. Höhenänderungen außerhalb des Grabens hängen, wie auch schon bei den anderen Analysen beschrieben, mit der Veränderung der Vegetation zusammen.

Die Höhenänderungen der Jahre 2013 auf 2016 sind nicht so stark ausgeprägt wie die der zuvor beschriebenen Analysen. Die visuelle Interpretation der Orthophotos der beiden Jahre wird durch die Überbelichtung des Grabenbereiches des Jahres 2016 erschwert. Der deutlich positive Bereich B1 wird durch den Eintrag von Lockersediment geprägt, welches sich auch visuell in den Orthophotos durch die Überschüttung grobblockigen Materials bestätigen lässt. Der positive Bereich B2 kann ebenfalls durch den Eintrag von Schutt begründet werden. Da dieser Bereich jedoch Teil der Straße ist, könnte der Eintrag im Zuge einer Straßensanierung erfolgt sein, da bei der Befahrung im Zuge der Feldarbeit beurteilt werden konnte, dass dieser Bereich gewisser Pflege bedarf, um befahrbar zu bleiben (ähnlich wie in der Periode zuvor). Im Bereich B ist das Gegenteil, also eine Freilegung von grobblockigem Material durch Verschiebung von Lockersediment der Fall. Unterhalb der Straße ist nahezu immer ein Abtrag zwischen den Zeiträumen festzustellen. Dies kann damit begründet werden, dass ein Einschneiden immer hangaufwärts erfolgt und dadurch auch die Straße besonderer Pflege bedarf, um nicht teilweise oder gänzlich abzubrechen. Dadurch können auch etwaige positive Höhenänderungen innerhalb der Straße erklärt werden.

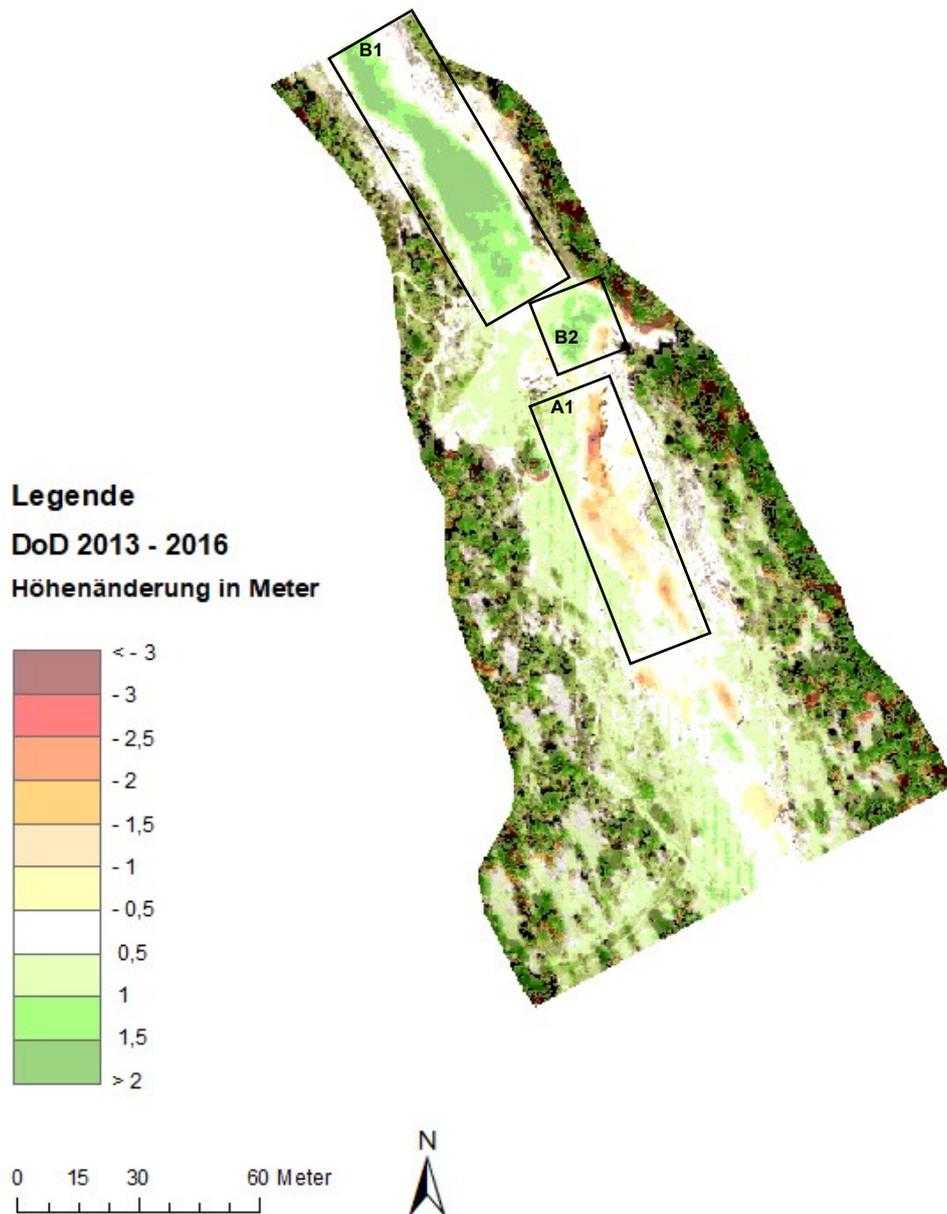


Abbildung 27: DoD 2013-2016 DG2 (eigene Darstellung)

5.3.3 DoD – DG3

In der dargestellten Zeitspanne von 24 Jahren fallen die Veränderungen der Höhe sehr deutlich aus. Auch durch die Umgestaltung dieses Abschnitts in Form von baulichen Maßnahmen und die Forstaktivitäten verzeichnet dieses Detailgebiet starke Änderungen.

Das dritte Detailgebiet wurde aufgrund der menschlichen Aktivität in den Jahren 1991 bis 1992 in Form von baulichen Maßnahmen ausgewählt (siehe Abbildung 28). Diese Aktivität spiegelt sich deutlich in der Höhenanalyse von 1973 zu 1997 wider. Im Bereich A sind, wie auf den Ausschnitten der Orthophotos rechts in der Grafik ersichtlich, starke Veränderungen im ganzen Bereich zu erkennen. Die Errichtung des 140 Meter langen Leitdamms mit Abschlusswerk und einer Baustellen- und Räumzufahrt hatte zur Folge, dass der Waldbestand im östlichen Teil des Gebietes abgeholzt wurde. Dies verzeichnet sich in deutlich negativen Höhenänderungen. Auch im Bereich B1 deutlich erkennbar ist die Höhenzunahme durch den Leitdamm, welcher sich in der Form der Höhenzunahme ebenfalls erkennen lässt.

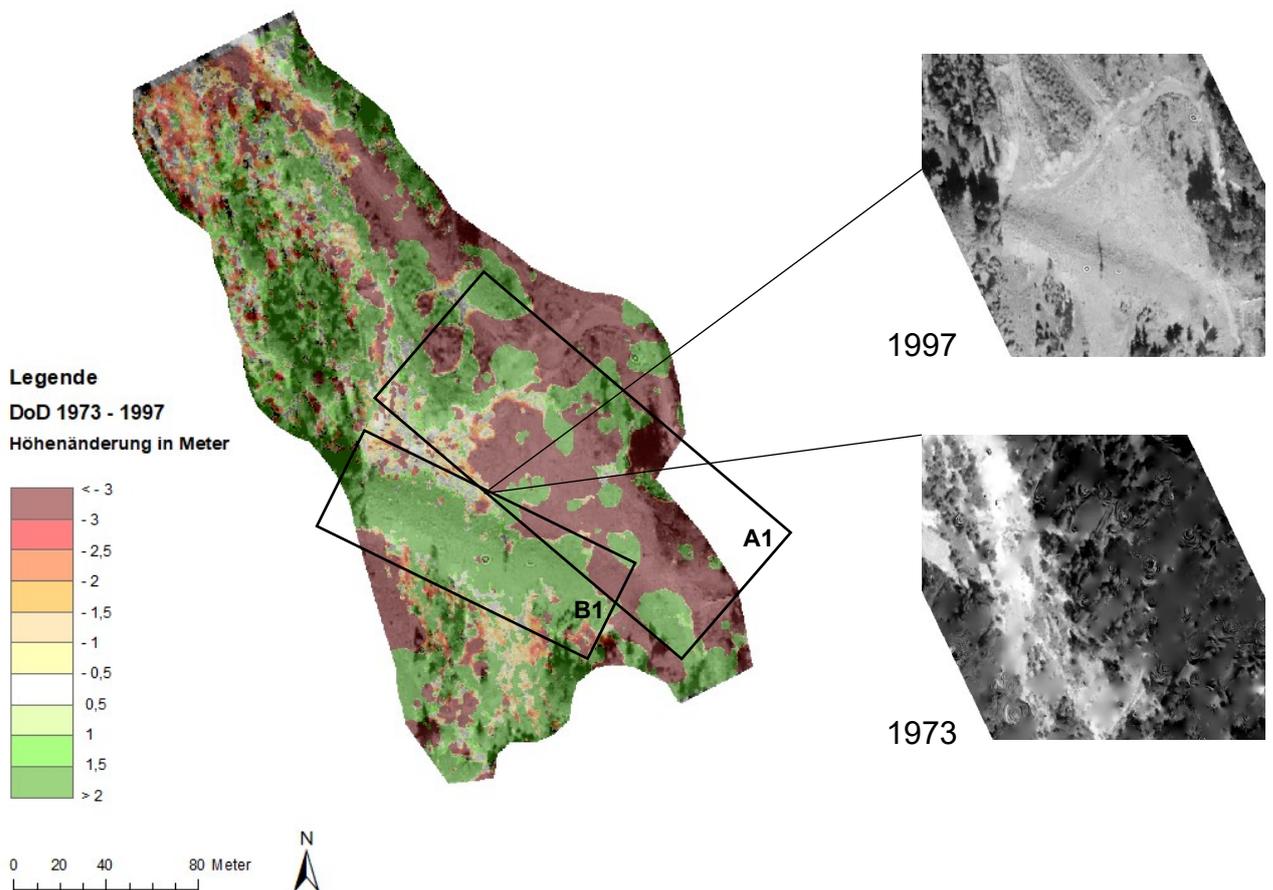


Abbildung 28: DoD 1973-1997 DG3 (eigene Darstellung)

In der Zeitspanne 1997 bis 2004 (siehe Abbildung 29) ist das Anwachsen der Vegetation wie der des Baumbestandes auf dem Leitdamm (Bereich B) mit Höhen von mehr als 1,5 bis größer 2 Metern deutlich erkennbar. Der kahle Bereich östlich des Leitdamms wird durch den Baumbestand oberhalb vor starken Ein- oder Abtragungen

geschützt, daher sind dort nur leichte Höhenänderungen zu erkennen. Die negativen Werte im Bereich A können durch die Veränderung des Baumbestandes sowie durch die Abtragung von Sediment im kanalisierten Grabenbereich erklärt werden. Im Grabenbereich außerhalb dieses Kanals sind ebenfalls Abtragungen zu verzeichnen, jedoch nicht in größerem Ausmaß. Die Bereiche der, in der Zeitspanne 1973 bis 1997, gerodeten Flächen erfahren eine Zunahme an Höhe, welche durch das An- und Weiterwachsen von Vegetation gedeutet werden kann.

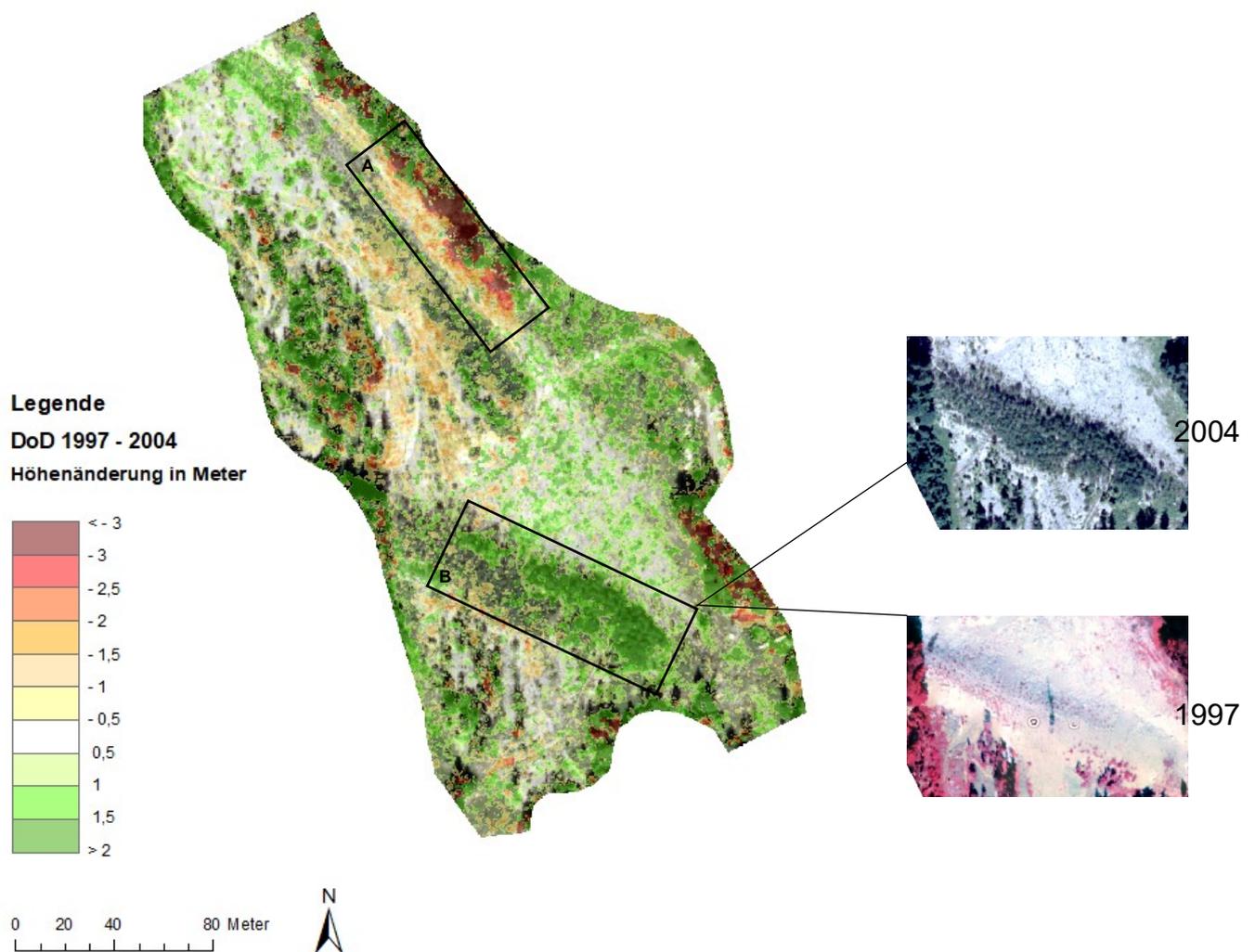


Abbildung 29: DoD 1997 - 2004 DG3 (eigene Darstellung)

Zwischen den neun Jahren von 2004 bis 2013 können schon beim Vergleich der beiden Orthophotos (siehe Abbildung 30) deutliche Veränderungen, vor allem in den Bereichen A und B des Grabens festgestellt werden. Im nördlichen Bereich (A) des Detailgebiets ist eine deutlich positive Höhenänderung zu verzeichnen. Es ist

anzunehmen, dass die Vegetation in diesem Bereich von Lockersediment überschüttet wurde. Im Bereich B, welcher menschlich überprägt wurde, sind Höhenänderungen im negativen Bereich erkennbar, welche aber nicht so stark wie in anderen Gebieten ausfallen. Über das ganze Gebiet wird deutlich, dass sich der Kanal innerhalb des Grabenbereichs verbreitert und bis in das sanierte Gebiet vorstößt. Deutlich negative Änderungen im nordöstlichen Teil des Gebiets sind auf weitere Rodungen zurückzuführen.

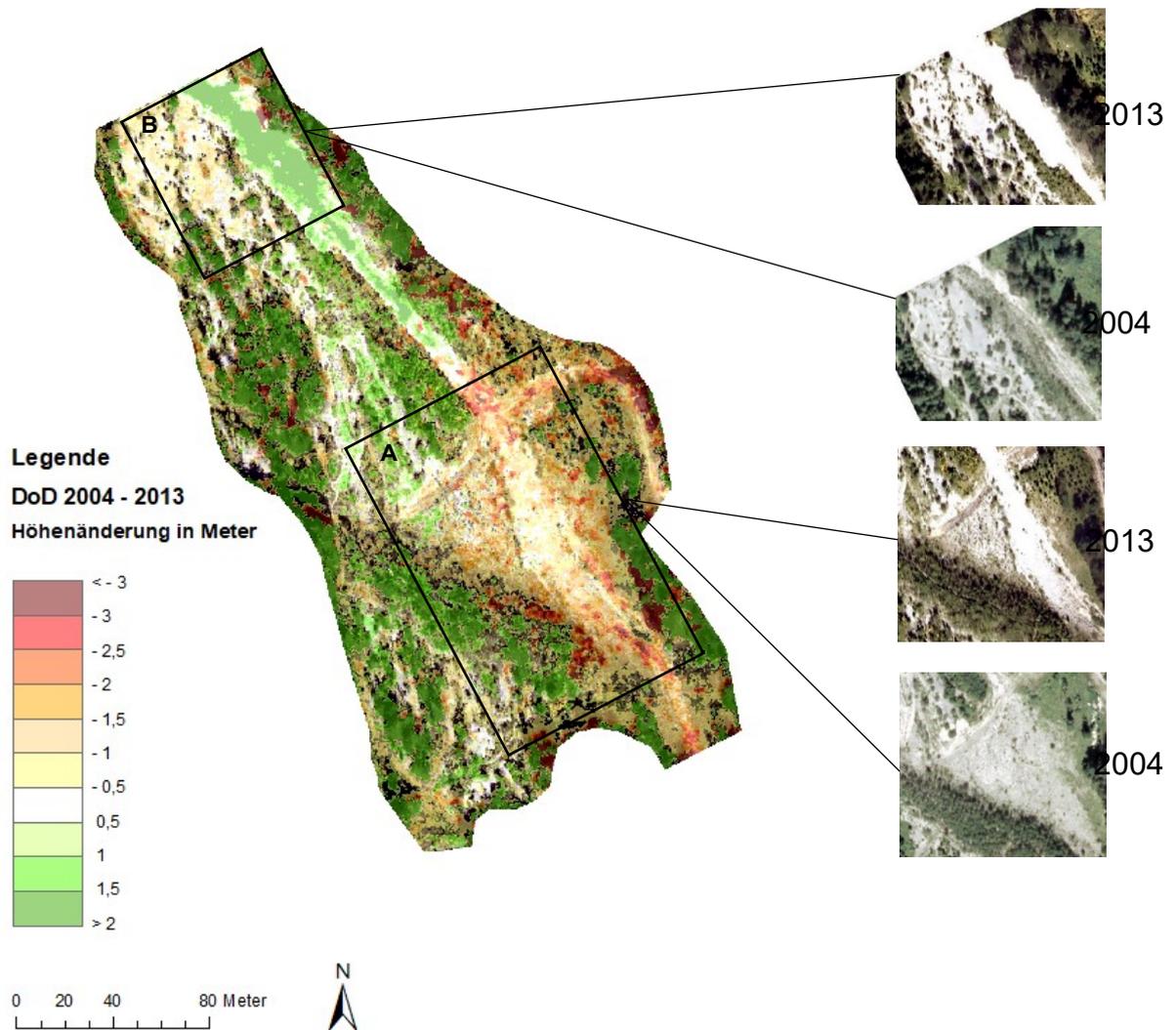


Abbildung 30: DoD 2004-2013 DG3 (eigene Darstellung)

5.3.4 DoD – DG4

Das vierte Detailgebiet wurde ausgewählt, da in den Jahren von 1989 bis 1990 ein Überleitungsbauwerk sowie von 1990 bis 1991 ein Querwerk erbaut wurde.

Ursprünglich war angedacht, den Fokus der Analysen auf die Zeitspanne (1973 bis 1997) dieser Jahre zu legen. Aufgrund der verfügbaren Daten, 1973 sechs und 1997 zehn Bilder, welche das Detailgebiet nicht zur Genüge abdecken, wurden bei den Analysen keine ausreichend genauen Ergebnisse erzielt und daher konnten diese Jahre leider nicht für eine aussagekräftige Analyse berücksichtigt werden.

Zwischen den Jahren 2004 und 2013 können im Bereich A des vierten Detailgebiets starke Veränderungen sowohl visuell als auch durch die Höhenanalyse wahrgenommen werden. Grabenabwärts, zum Überleitungsbauwerk, wurde der Baumbestand innerhalb des Grabens entfernt und durch Pflasterung eine künstliche Rinne erbaut. Ab dem Bauwerk Richtung Enns sind ebenfalls stark negative Höhenänderungen durch das Entfernen von Bäumen auffällig. Gleichbleibende Höhen sind im Bereich der Eisenbahn und der Forststraße zu verzeichnen.

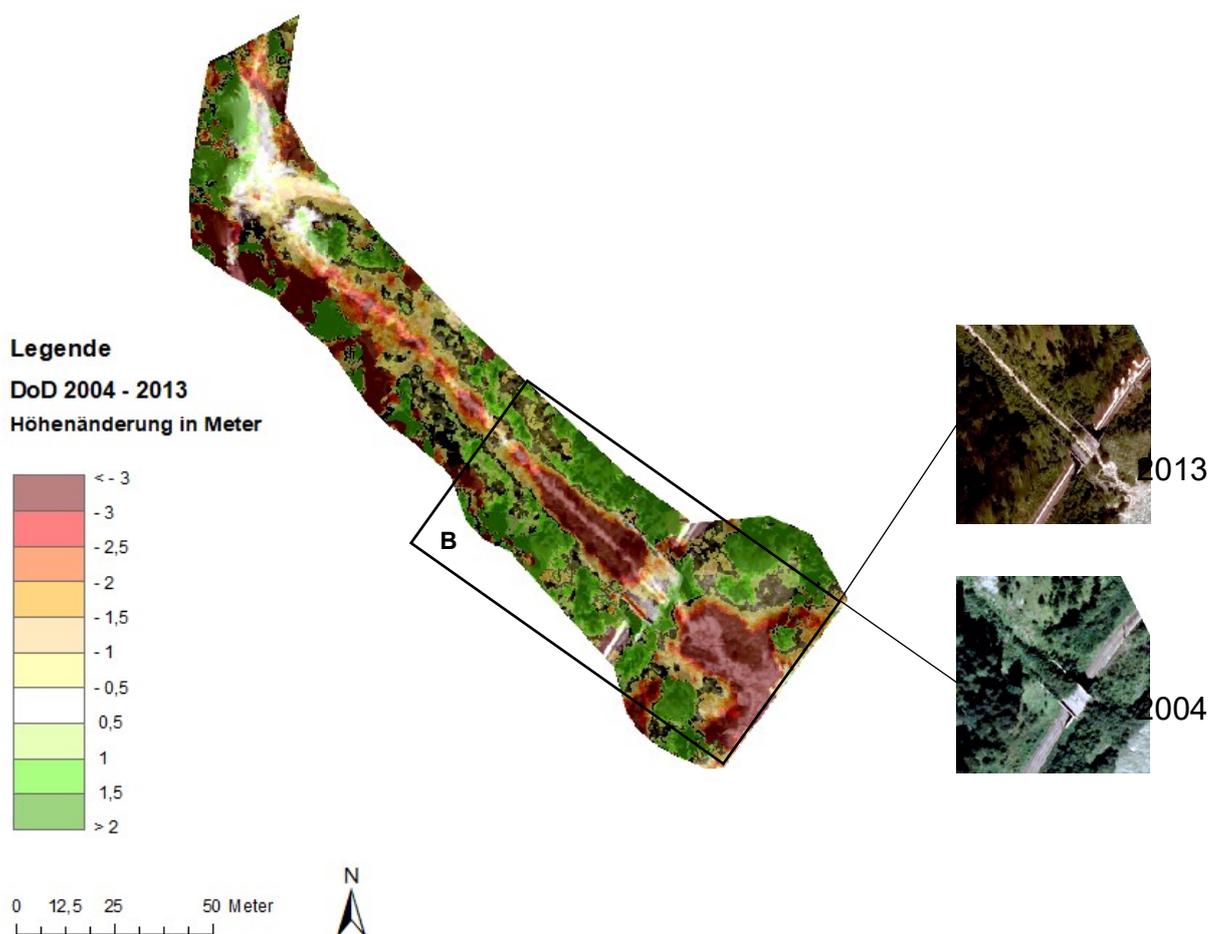


Abbildung 31: DoD 2004-2013 DG4 (eigene Darstellung)

Die Veränderungen der Jahre 2016 bis 2020 sind vor allem im Bereich des Überleitungsbauwerks und des Grabenbereichs stark negativ. Bei Betrachtung der Orthophotos kann eine Veränderung dahingehend festgestellt werden, dass sich diese deutlich negativen Bereiche durch das Übergehen von Schutt- in Vegetationsflächen auszeichnen. An dieser Stelle sei festgehalten, dass durch die angrenzende Vegetation eine Georeferenzierung schwierig war und die Höhenveränderungen mit äußerster Vorsicht betrachtet werden sollten. Höhenänderungen von 2,5 bis größer drei Metern sind im Bereich des Überleitungsbauwerks eigentlich nicht zu erwarten, ebenfalls kommen die negativen Höhenänderung im Bereich der Bahngleise so nicht vor und sind auf die schwierige Georeferenzierung zurückzuführen. Hingegen können negative Höhenänderungen nach dem Überleitungsbauwerk in Richtung Enns in dieser Größenordnung als möglich betrachtet werden.

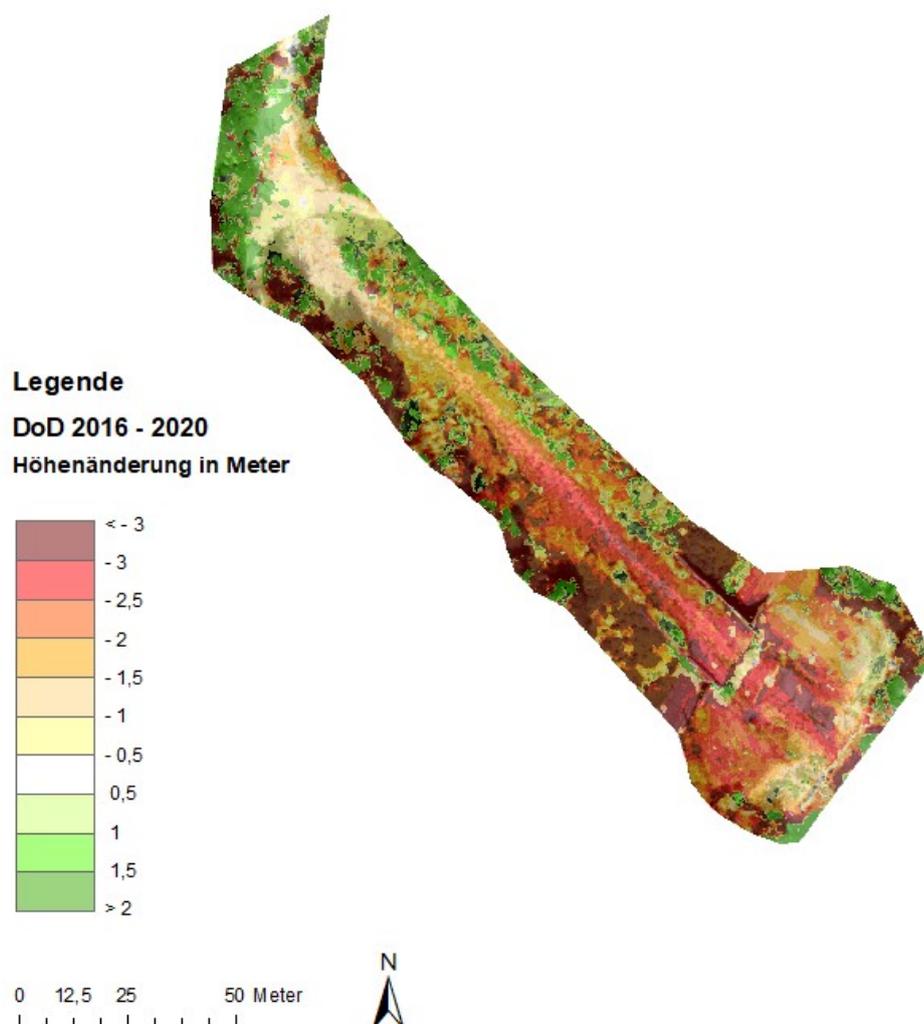


Abbildung 32: DoD 2016-2020 DG4 (eigene Darstellung)

5.4 Detailgebietkartierung

Für die Detailgebietkartierung wurde ein Kartierungsmaßstab von 1:500 gewählt, welcher für eine Auflösung von 34,6 cm als ausreichend bezeichnet werden kann. In den jeweiligen Detailgebieten der einzelnen Jahre wurde zwischen Vegetation, Rekultivierung, Schutt und Verbauung unterschieden, da diese Klassifizierung die Auswirkungen menschlicher Aktivität und deren Auswirkungen auf die Vegetation ausreichend aufzeigt. Als Schwierigkeiten der Kartierungen stellten sich die Auflösung von 34,6 cm zum Unterscheiden von Verbauungen zu Schutt oder Vegetation, die Licht- und Schattenverhältnisse sowie die Dichtheit der Vegetation, welche das Erkennen von darunterliegenden Schuttflächen erschwerte, heraus.

5.4.1 Kartierung – DG 1

Die Kartierung des ersten Detailgebietes im oberen Teil des Kühgrabens zeigt wesentliche Veränderungen durch menschliche Aktivität. Wie in Abbildung 33 zu sehen ist, wurden zwischen den Jahren 1973 und 1997 bautechnische Maßnahmen gesetzt. Diese beschränken sich in diesem Detailgebiet auf flächig horizontal ausgerichtete Weidenflechtzäune, Holzkrainerwände sowie Pilotenwände (Skacel 2013).

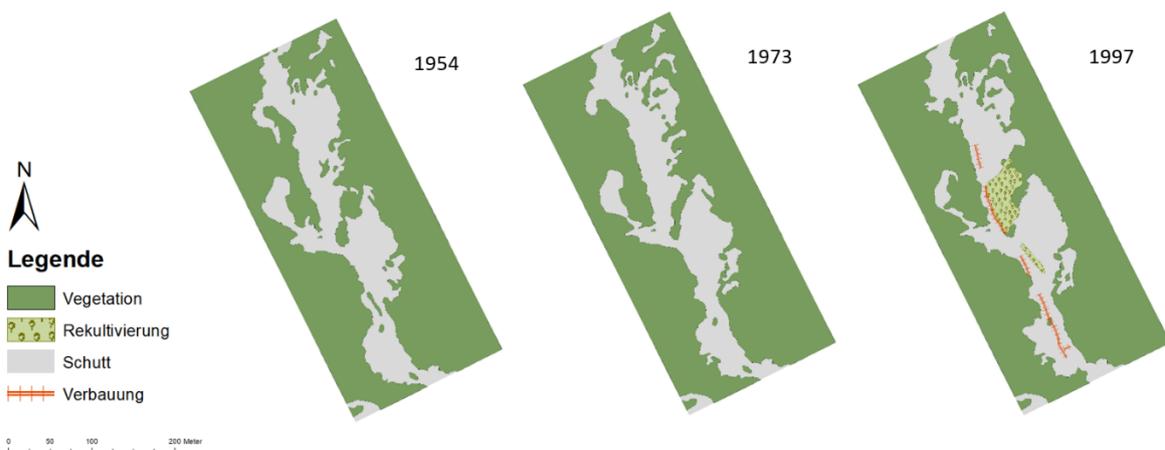


Abbildung 33: Vegetationskartierung DG1 1954, 1973 und 1997 (eigene Darstellung)

Bei verschiedenen Licht-/Schattenverhältnissen konnten Teile von Verbauungen nicht genau identifiziert werden, was bei den Kartierungen der Jahre 2013 auf 2016 im unteren Teil aufgrund der unterschiedlichen Kartierung der Verbauungen deutlich wird (siehe Abbildung 34). Diese Schwierigkeiten treten auch in den anderen Detailgebieten auf. Die vorhandenen Schuttflächen vergrößern sich vor allem aufgrund von Abbrechen der Geländekanten an den Hangbereichen bis in das Jahr 1997 stetig. Ab 1997 ist eine deutliche Rekultivierung in Form von Weideflechtzäunen zu erkennen. Diese Schutzmaßnahme hat anscheinend gegriffen und es kam in den folgenden Jahren zu einer Stabilisierung und einem Zuwachs der Hänge. Zwischen 1997 und 2004 wurden die ingenieurb biologischen Maßnahmen ausgeweitet.

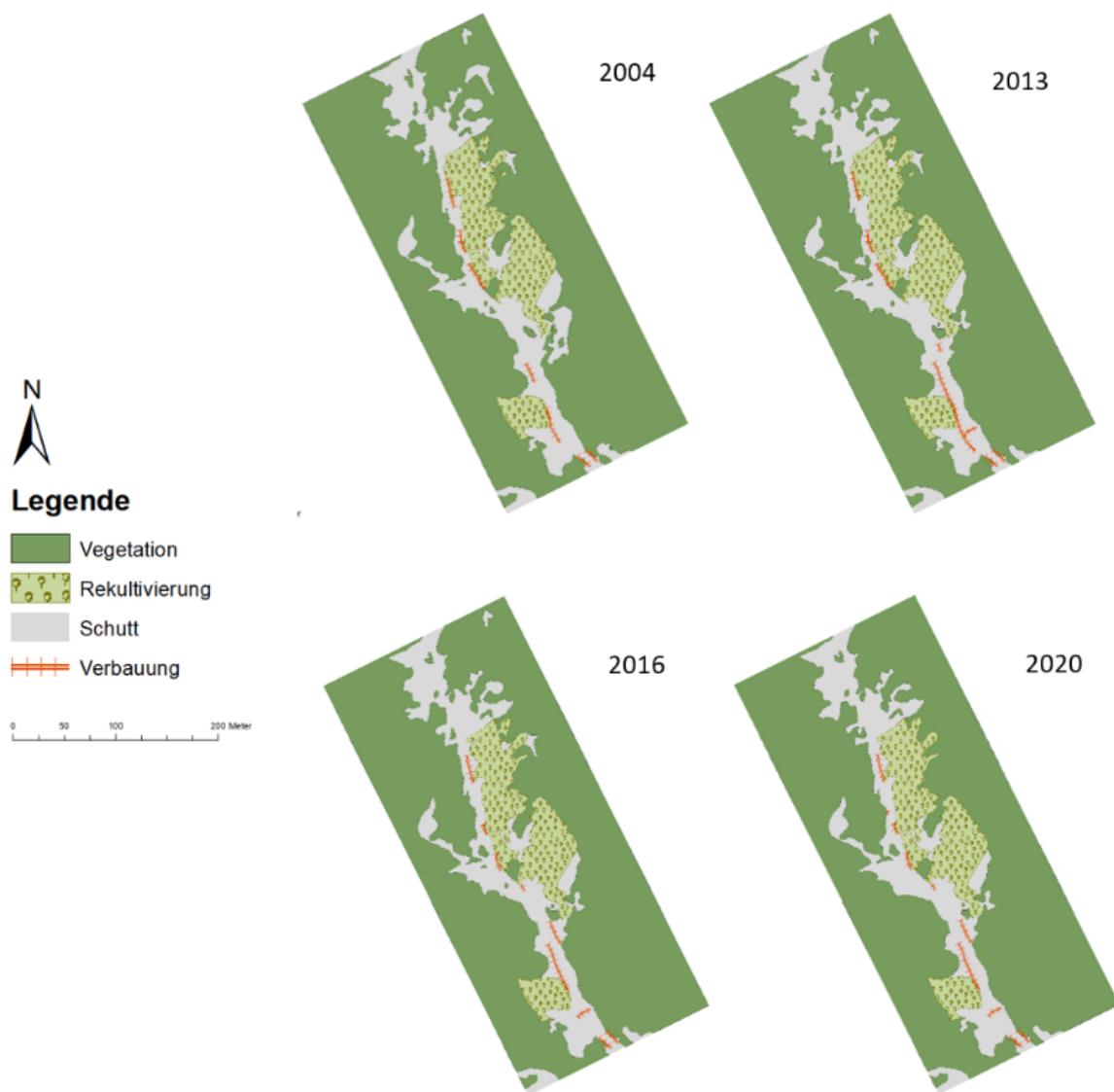


Abbildung 34: Vegetationskartierung DG1 2004, 2013, 2016 und 2020 (eigene Darstellung)

Spätere flächenhafte Veränderungen können durch das selbstständige Wachsen und Ausbreiten der verwendeten Vegetation erklärt werden.

Die gesamten Veränderungen des ersten Detailgebiets sind in der Abbildung 35 zusammengefasst. Die Veränderungen der Verbauungen werden hauptsächlich durch mögliche Kartierungsfehler durch schlechte Erkennbarkeit, aufgrund von Überbelichtung oder Schattenwurf in den Luftbildern und durch das Verschieben der einzelnen Verbauungsteile verursacht. Die Rekultivierungsflächen veränderten sich nach dem Jahr 2004 nicht mehr in ihrer Ausbreitung.

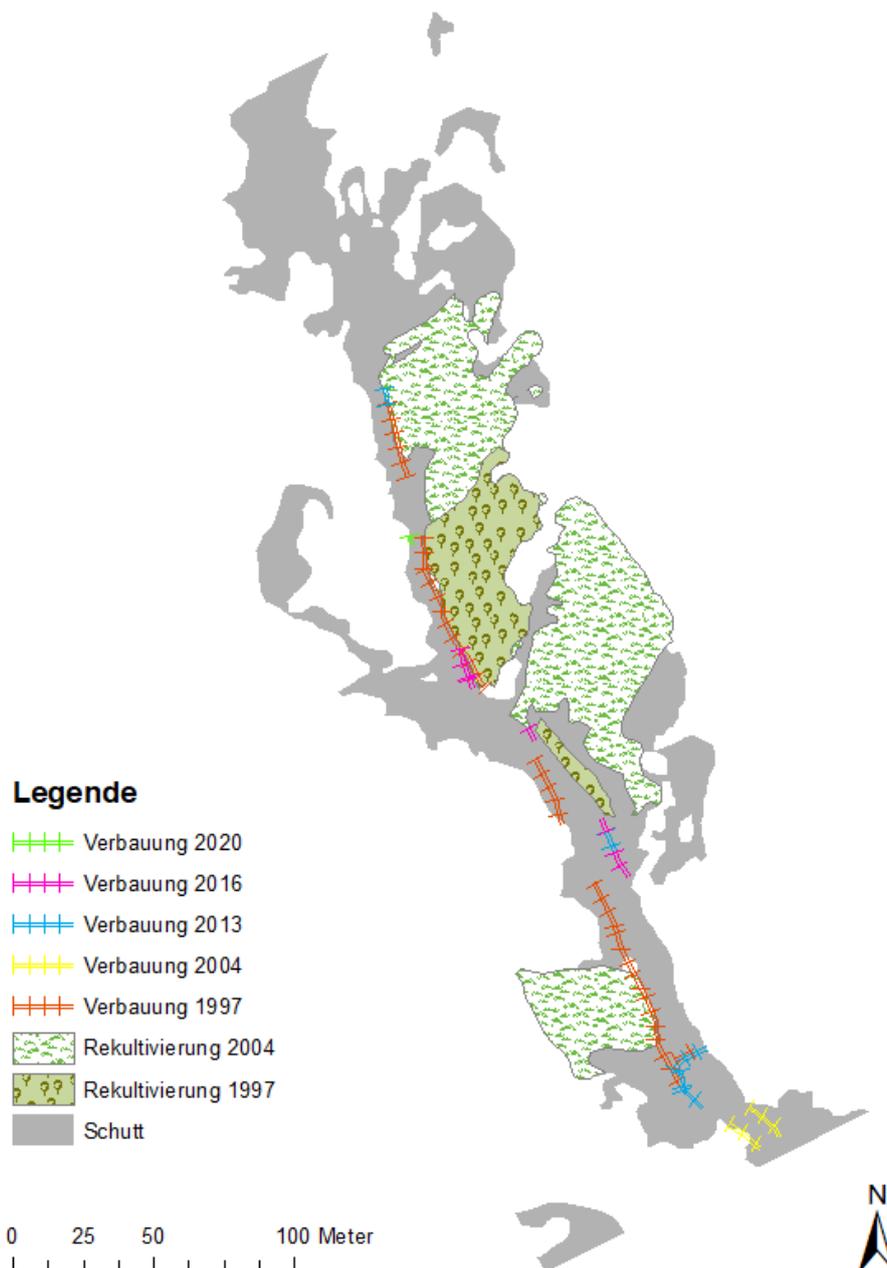


Abbildung 35: Veränderungen durch menschliche Aktivität DG1 (eigene Darstellung)

5.4.2 Kartierung – DG 2

Im Detailgebiet 2 wurden weder Rekultivierungsmaßnahmen noch Verbauungen angelegt. Hier ist die Auswirkung menschlicher Aktivität hauptsächlich durch die Veränderung der Vegetation durch Straßen sowie vermeintliche Schlägerungsarbeiten im Jahr 1997 zu erkennen (siehe Abbildung 36).

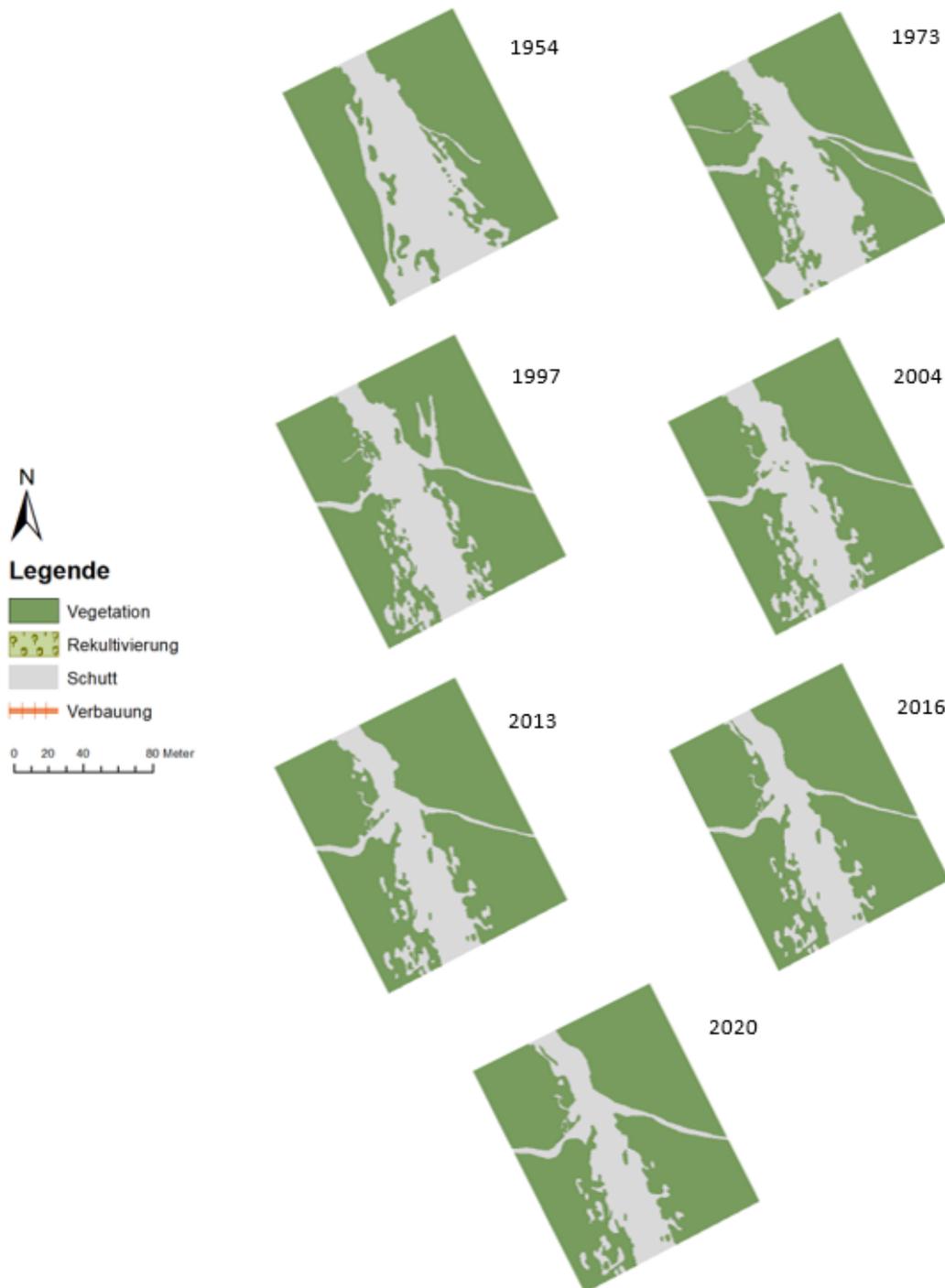


Abbildung 36: Vegetationskartierung DG2 alle Jahre (eigene Darstellung)

In den südlichen Teilen dieses Detailgebietes ist eine deutliche Veränderung von Schuttflächen zu Vegetationsflächen sichtbar. Allgemein kann gesagt werden, dass die Graben- und Hangbereiche sich nicht weiter ausgedehnt haben, sondern eine Veränderung in diesem Bereich in vertikaler Form (siehe Kapitel 4.2) durch Höhenänderung erfolgt ist.

5.4.3 Kartierung - DG 3

Im Detailgebiet 3 fand eine deutliche Veränderung der Vegetationsverhältnisse statt. Wie zu sehen in Abbildung 37 waren nur in der westlichen Hälfte des Detailgebiets Schuttflächen, ausgenommen der Forststraße zu finden. Im Jahr 1997 sind deutliche Ausbreitungen der Schuttflächen Richtung unteren Teil des Detailgebietes zu verzeichnen. Wie im Kapitel 4.5 zu den Sanierungsplänen beschrieben, wurde 1991/92 ein Leitdamm mit Abschlusswerk errichtet, inklusive Baustellen- und Räumzufahrt. Anschließend wurde jene Verbauung umfassend begrünt. Diese kann man in den Orthophotos der Jahre ab 1997 deutlich erkennen.

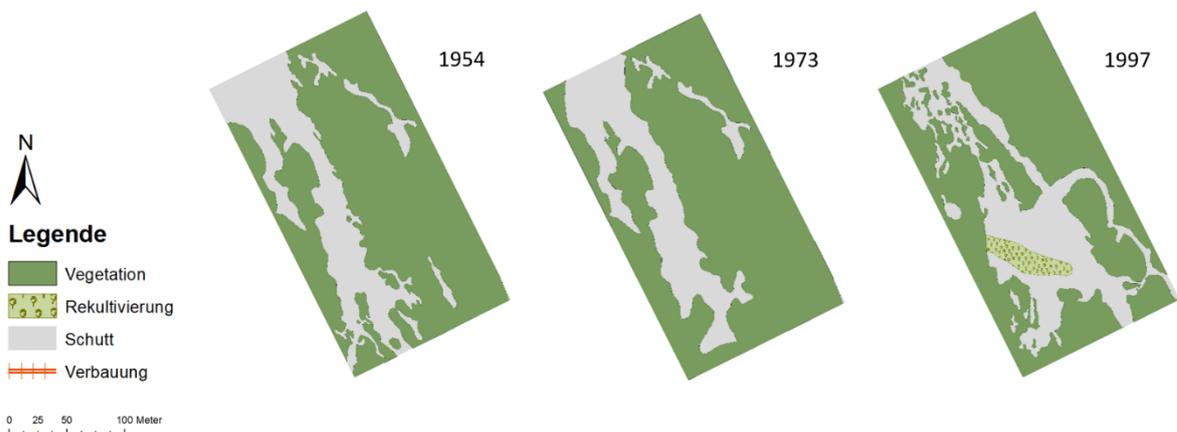


Abbildung 37: Vegetationskartierung DG3 1954, 1973 und 1997 (eigene Darstellung)

Ab 1997 lässt sich das Anwachsen der Begrünung auf dem Leitdamm mit Abschlusswerk beobachten. Die Vegetation in den anderen Teilen des Gebietes bleibt einigermaßen gleich. Die Ausbreitung der Rekultivierung verbreitet sich auch innerhalb des Grabenbereichs, nicht nur ausschließlich auf dem Leitdamm.

Interessant ist in diesem Zusammenhang, dass Schuttflächen im südlichen Teil des Detailgebiets durch den Schutz der Verbauung wieder durch Vegetation bedeckt wurden. Die Ausbreitung der Rekultivierung in den Jahren darauf wurde nicht durch menschliche Aktivität initiiert, sondern ist auf die natürliche Ausbreitung der Vegetation selbst zurückzuführen.

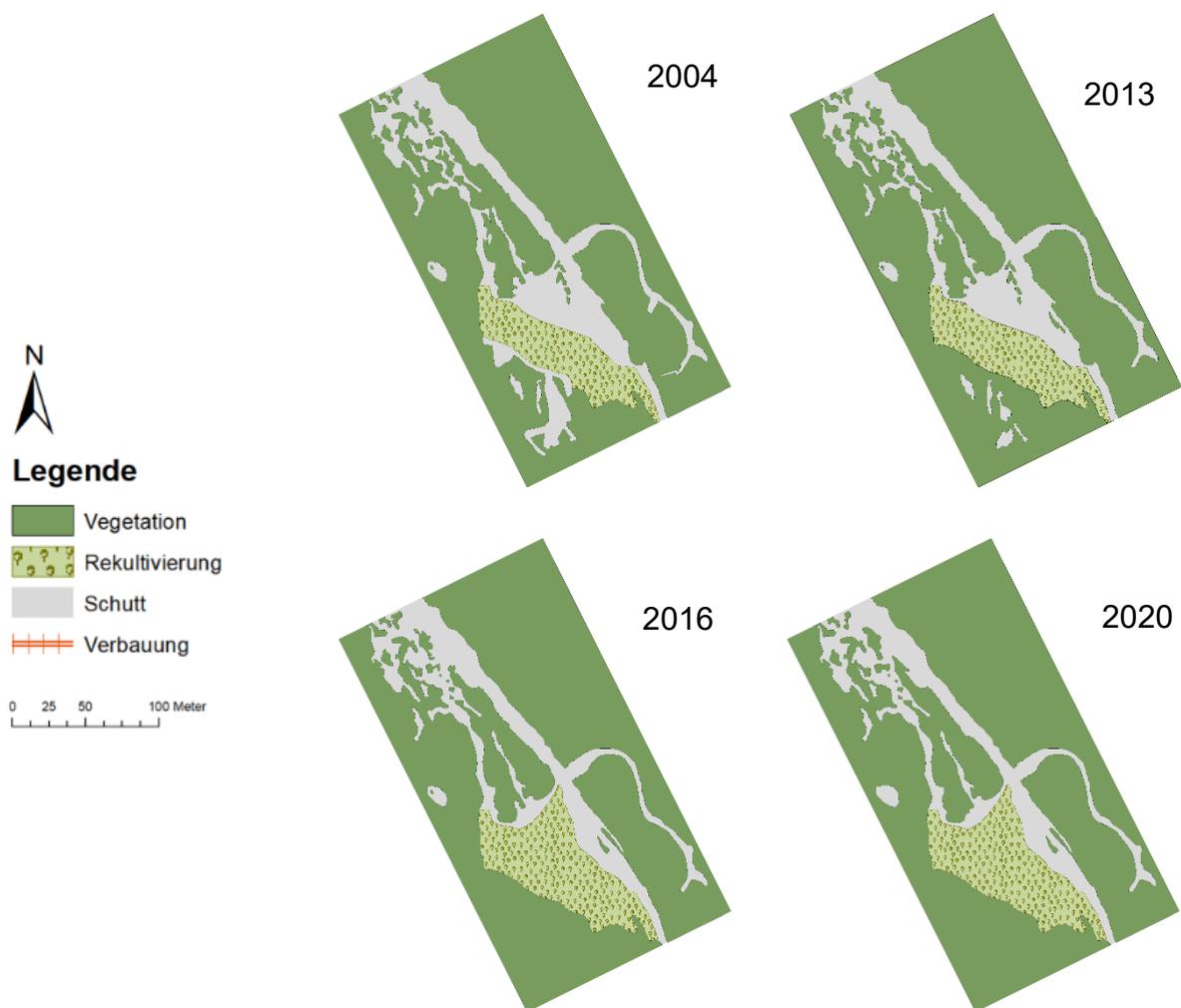


Abbildung 38: Vegetationskartierung DG3 2004, 2013, 2016 und 2020 (eigene Darstellung)

Die Veränderungen der Rekultivierungsflächen wurden in der Darstellung 39 zusammengefasst. Diese Rekultivierung wurde als Begrünung des errichteten Leitdammes angelegt und wird daher in diese Kategorie als die der Verbauung gezählt. Diese Begrünung breitete sich über die Jahre flächenmäßig aus, die eingenommene Fläche ist daher keine Rekultivierungserweiterung durch den Menschen, sondern natürlichen Ursprungs.

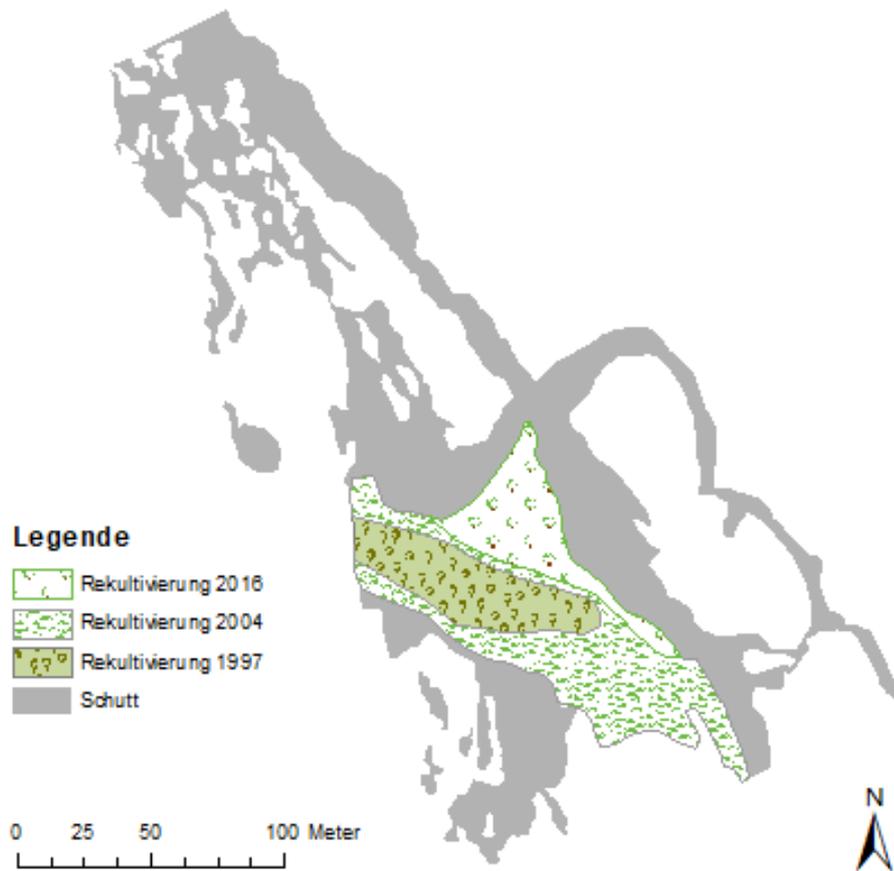


Abbildung 39: Veränderungen durch menschliche Aktivität DG3 (eigene Darstellung)

5.4.4 Kartierung – DG 4

Im vierten Detailgebiet sind vor allem Veränderungen im Mündungsbereich erkennbar. Durch die, in diesem Kapitel schon angesprochenen, Schwierigkeiten der Kartierung konnte teilweise die Forststraße nicht genau für jedes Jahr kartiert werden.

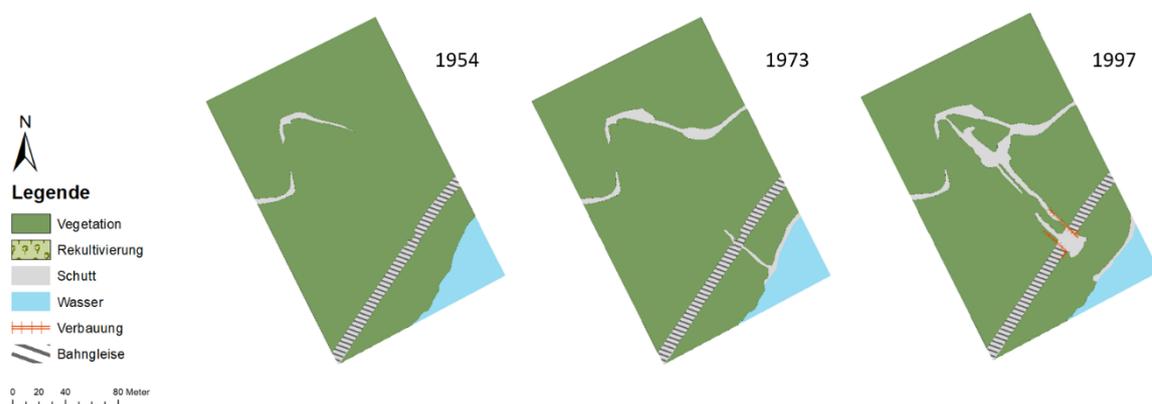


Abbildung 40: Vegetationskartierung DG4 1954, 1973 und 1997 (eigene Darstellung)

Wie im Kapitel über die Sanierungspläne beschrieben, wurde in den Jahren 1989/90 ein Murenüberleitungsbauwerk mit Schutzdamm gebaut und ein Gerinneausbau im Mündungsbereich durchgeführt. Diese Veränderung ist in der Kartierung von 1997 deutlich sichtbar (siehe Abbildung 40).

Erst ab 2004 (siehe Abbildung 41) wird sichtbar, wie Schutt aus den oberen Teilen des Kühgrabens sich Richtung Enns schiebt, sich im Mündungsbereich ansammelt und die Vegetation allmählich verdrängt. Die Verbauungen im Grabenbereich ab dem Untersuchungsjahr 1997 werden dadurch sichtbar, dass die Vegetation von 2004 auf 2013 in diesem Abschnitt weicht. Grundsätzlich ist zu erwähnen, dass die Kanalisierung, wie auf den Kartierungen gut ersichtlich, sehr gut zu einem Schutttransport beitragen dürfte.

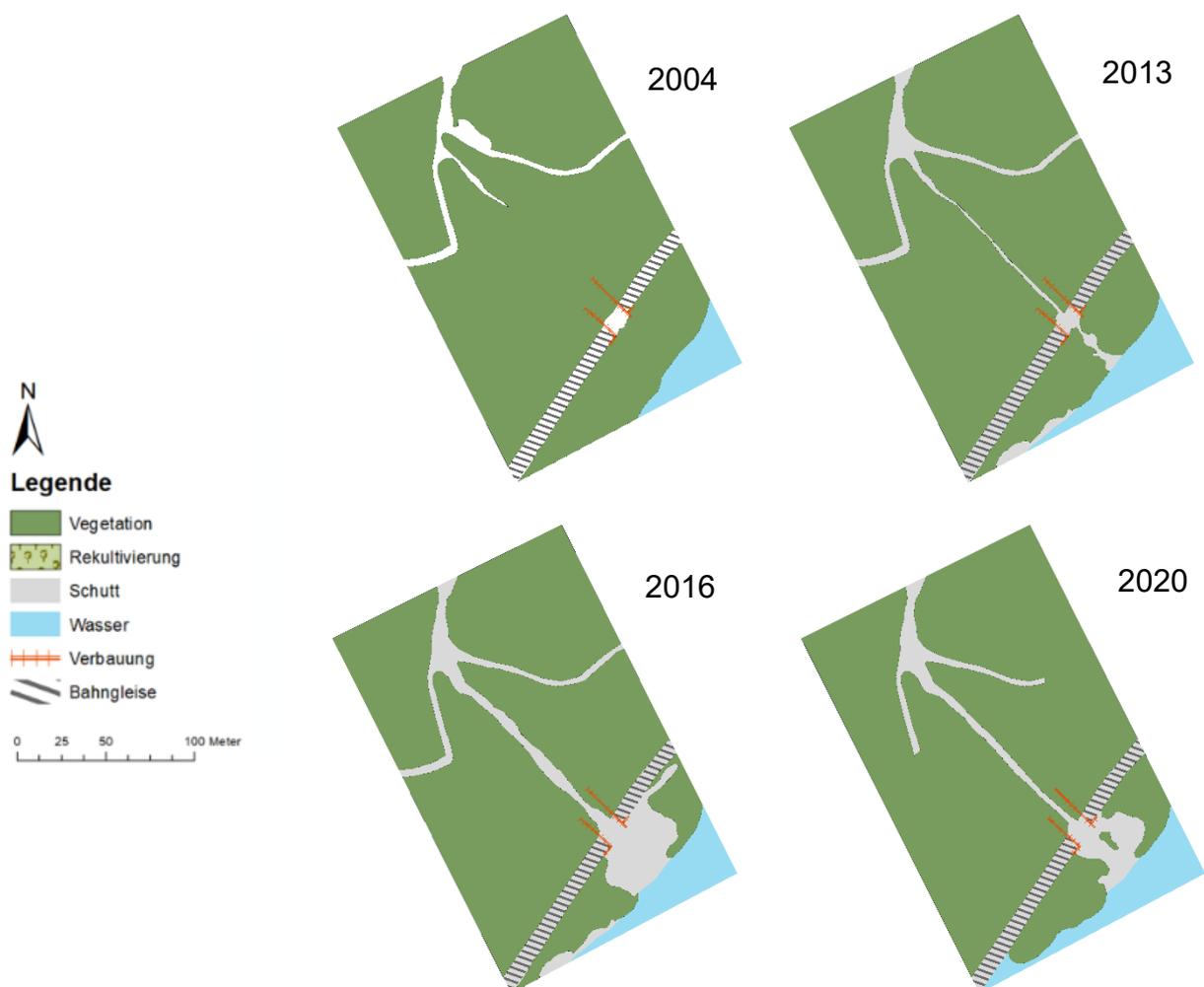


Abbildung 41: Vegetationskartierung DG4 2004, 2013, 2016 und 2020 (eigene Darstellung)

Die Veränderungen des vierten Detailgebiets werden in zwei Abbildungen (42 und 43) getrennt dargestellt. Der Grund hierfür ist, dass im Grabenbereich die Schutt- und Vegetationsflächen abwechselnd dominieren. Auch wurden nur die Jahre berücksichtigt, in denen Veränderungen erkennbar sind. Zwischen den Jahren 1973 und 1997 konnten Schuttflächen innerhalb der geschlossenen Vegetation im Grabenbereich entstehen und eine Verbauung wurde am Fuße des Grabens errichtet. Zwischen den Jahren 1997 und 2004 konnten sich die Schuttflächen im oberen Teil des Detailgebiets sowie auf der Verbauung etablieren, jedoch konnte Vegetation auf den vorher entstandenen Freiflächen anwachsen.

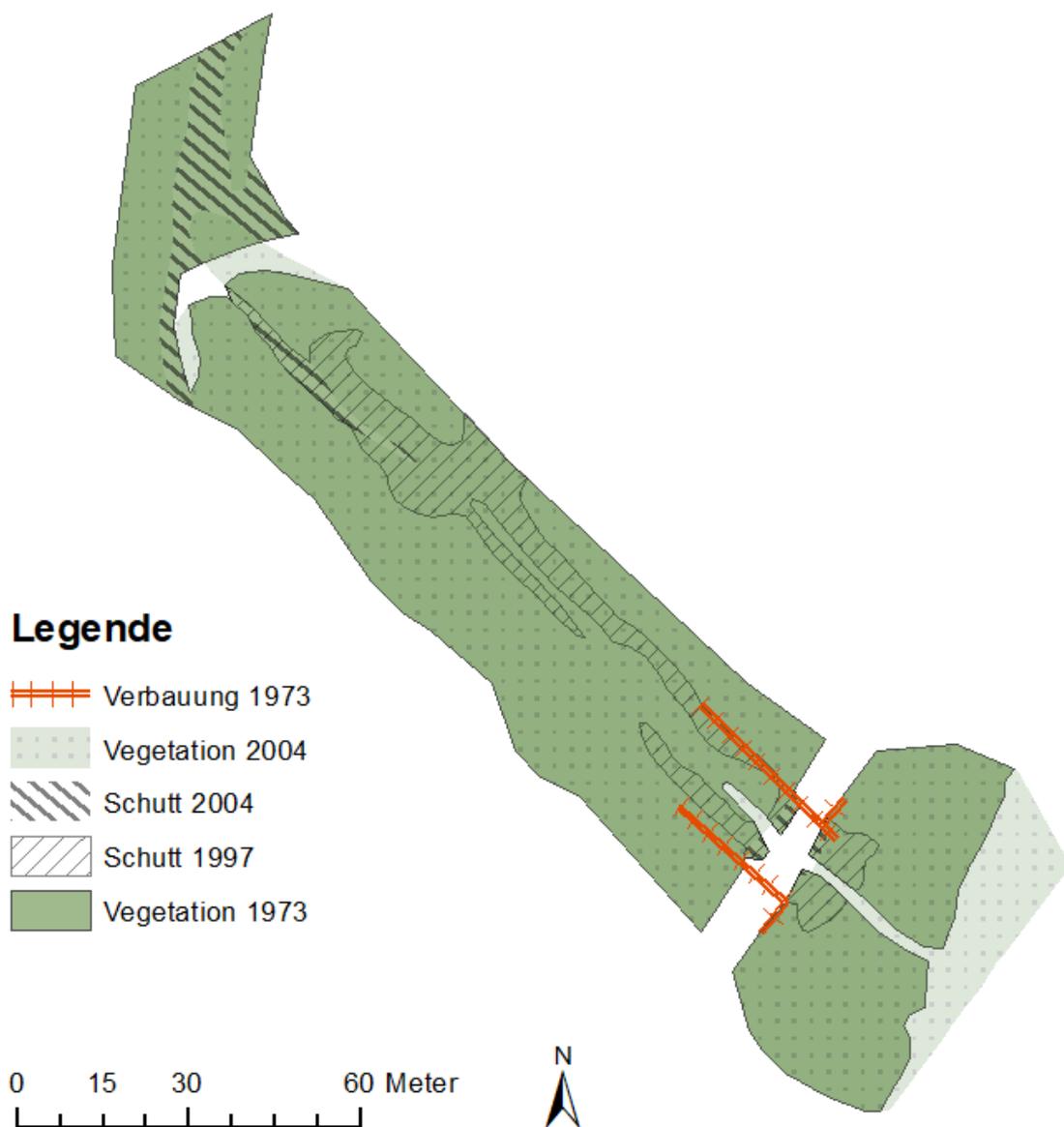


Abbildung 42: Veränderungen durch menschliche Aktivität 1973-2004 DG4 (eigene Darstellung)

Zwischen den Jahren 2004 und 2013 fanden Veränderungen ausschließlich in Form von Ausbreitung der Schuttflächen im Bereich der Straße und der Mündung in die Enns statt (siehe Abbildung 43). Diese Ausbreitung setzte sich bis 2016 fort, wodurch ein durchgehender Grabenbereich sichtbar wurde. Im unteren Teil Richtung Verbauung wurden die entstandenen Schuttflächen zwischen den Jahren 2016 und 2020 wieder durch Vegetation bedeckt.

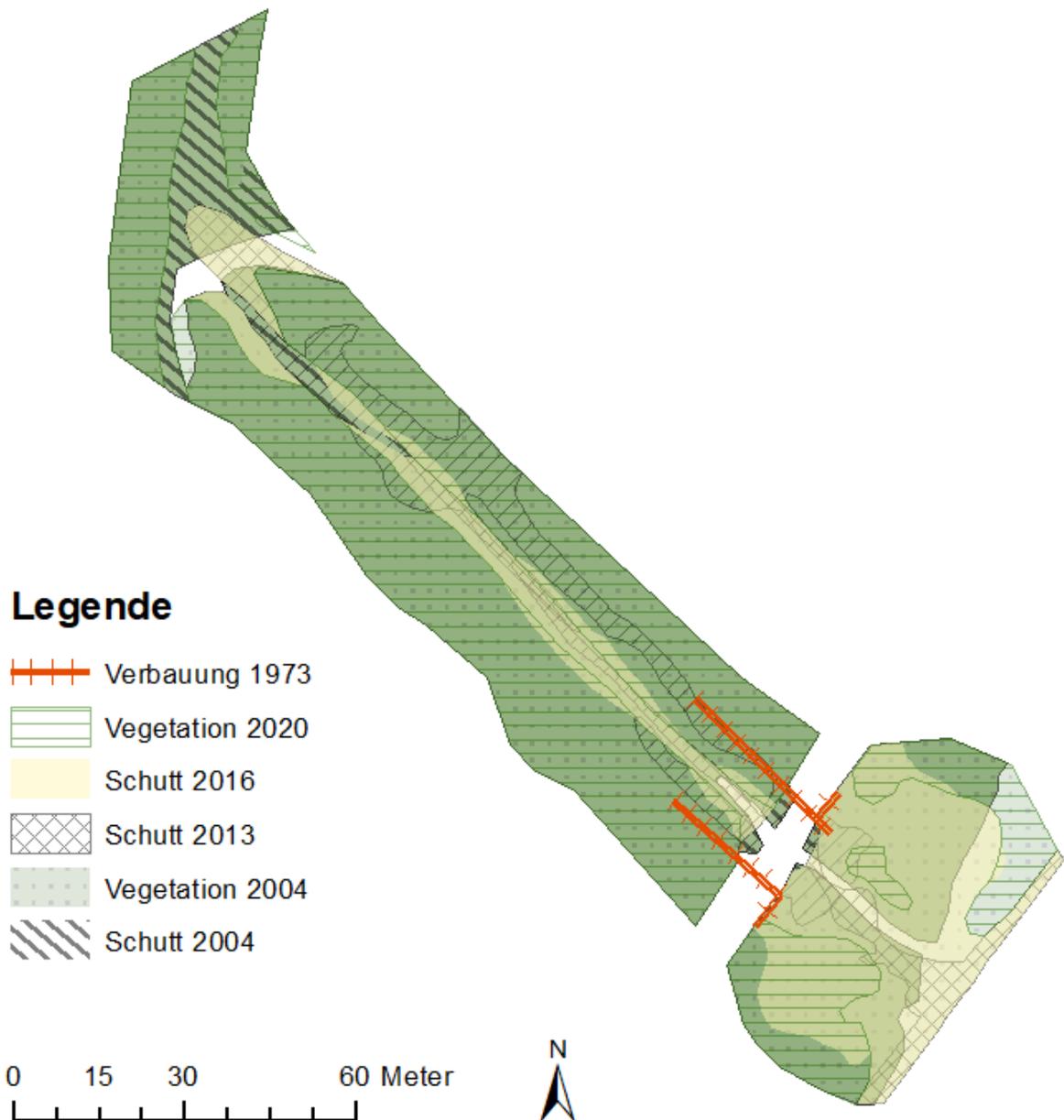


Abbildung 43: Veränderungen durch menschliche Aktivität 2004-2020 DG4 (eigene Darstellung)

5.5 Vergleich Rotgraben

5.5.1 Bautechnische Maßnahmen

Nach dem technischen Bericht von Zedlacher (1986) zum Verbauungsprojekt Küh- und Rotgraben wurden am 1. Juli 1949 107mm Niederschlag in Gstatterboden gemessen, welcher einen heftigen Murgang im Rotgraben auslöste. Am 16. August 1979 wurden, ebenfalls durch starken Niederschlag, weitere Muren im Rotgraben ausgelöst (Skacel 2013). Bei den Sanierungen des Rot- und Kühgrabens wurde ein Ablenkdammbauwerk im östlichen Teil des Grabens erbaut und dieser soll bei möglichen weiteren Ereignissen das Geschiebe über die erbaute Galerie in die Enns leiten (Hasitschka et. al 2014). Anders als im Kühgraben wurden weder technische noch biologische Maßnahmen im oberen Teil des Grabens getätigt, doch wurde mehr hinsichtlich Verbauung und Lenkung weiterer Muren gebaut. Wie in Abbildung 44 zu sehen ist, wurde 1994/95 ein Murenfangbecken mit einem Fassungsvermögen von ca. 30.000m³, was um 10.000m³ mehr entspricht als die Mure 1979 Geschiebe hangabwärts befördert hat, errichtet. Die Schneidung des oberen Rauchbodenwegs mit dem Rotgraben wurde mit Stabilisierungsmaßnahmen saniert.

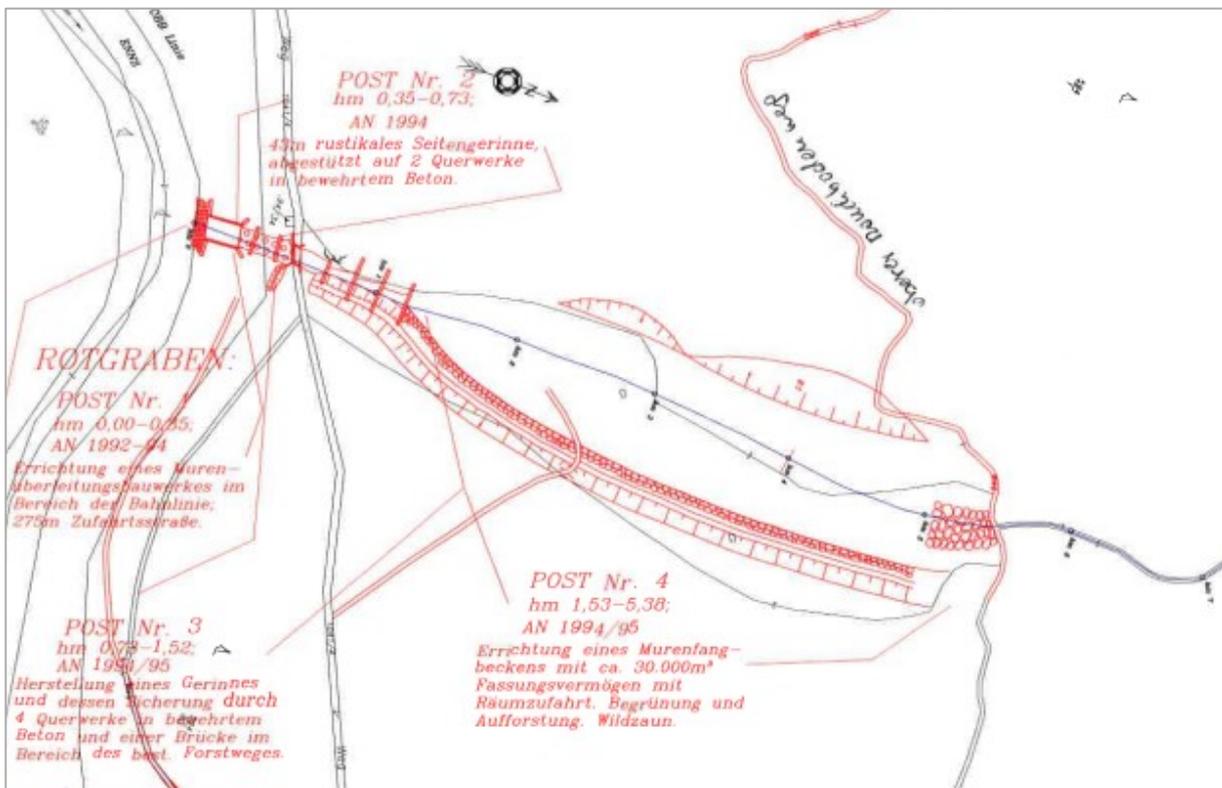


Abbildung 44: Lageplan des Verbauungsprojektes Rotgraben (eigene Darstellung nach Wildbach und Lawinenverbauung 2002)

5.5.2 Vergleich der Geologie

Wenn man Küh- und Rotgraben in ihrer Geologie miteinander vergleicht, werden Unterschiede deutlich (siehe Abbildung 45):

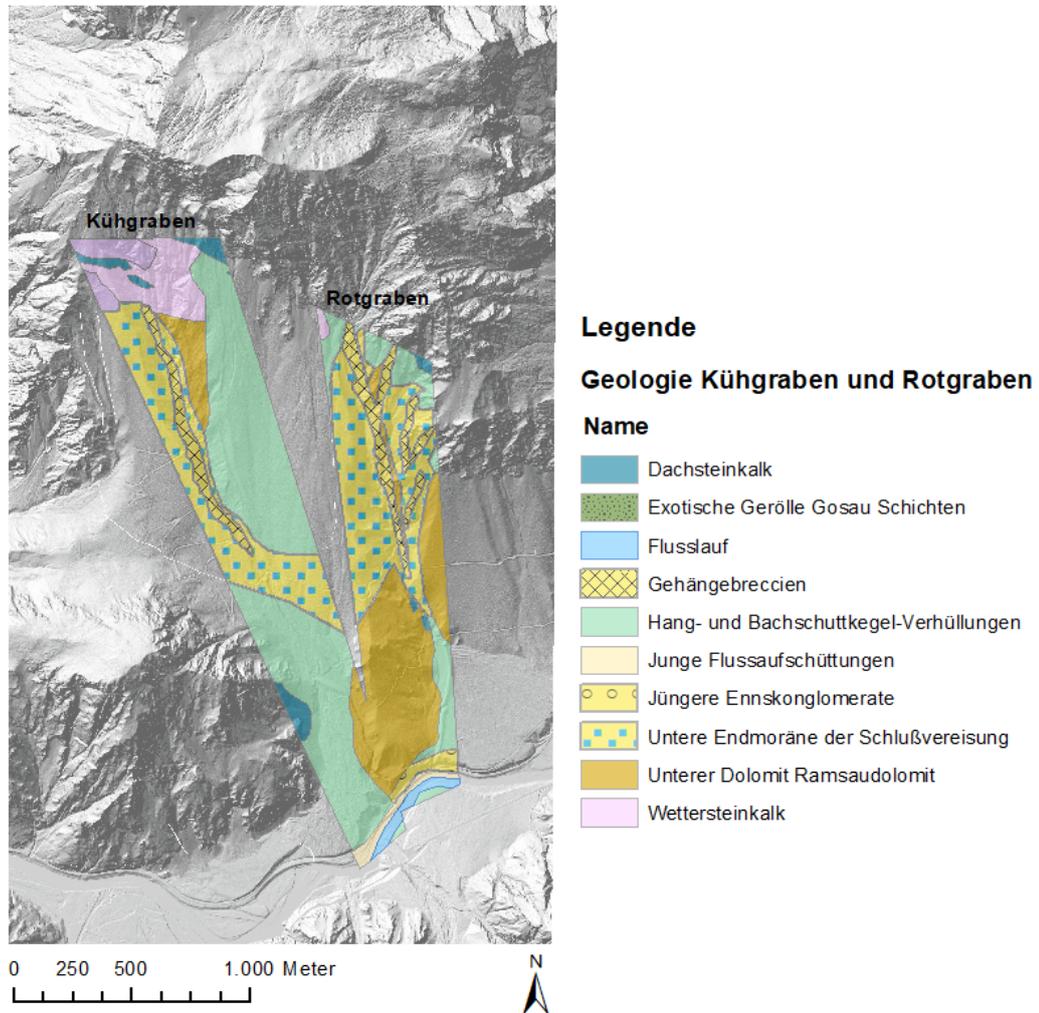


Abbildung 45: Geologie Küh- und Rotgraben (eigene Darstellung, Datengrundlage: Digitaler Atlas Steiermark 2021a, Ampferer 1935) [sic!]

Im Kühgraben sind deutlich mehr Flächen mit Hang- und Bachschuttverhüllungen als im Rotgraben zu finden. In diesen Bereichen wurden auch (siehe Kapitel 3.4.1) im oberen Bereich des Kühgrabens die ingenieurbioologischen Maßnahmen beziehungsweise generell bauliche Maßnahmen gesetzt, da diese Geologie durch Lockergestein zu Sedimentverlagerungen neigt. Der Rotgraben selbst ist in den oberen Bereichen zwar ähnlich wie der Kühgraben von Gehängebreccien und der unteren Endmoräne der Schlussvereisung, in den unteren Bereichen aber

hauptsächlich durch den Ramsaudolomit der Gerstriegels geprägt. Zwischen den zwei Ramsaudolomitschichten kanalisiert sich der Rotgraben in einer Engstelle, welche im Kühgraben so nicht vorhanden ist. Bis zu dieser Engstelle ist keine Verbauung zu finden. Ab dieser Richtung Enns wurden bautechnische Maßnahmen gesetzt. Im Bereich der Mündungen der Gräben in die Enns finden sich bei beiden Gräben junge Flussaufschüttungen und beim Rotgraben auch jüngere Ennskonglomerate. In diesen Bereichen wurde bei beiden Gräben ein Überleitungsbauwerk von Muren, weniger von der Geologie abhängig, errichtet.

Festzustellen ist, dass die unterschiedliche Errichtung von bautechnischen Maßnahmen in Küh- und Rotgraben hauptsächlich von dem Vorkommen von Hang- und Bachschuttverhüllungen abhängig ist, da diese hangstabilisierende Maßnahmen erfordern. Durch die Gehängebreccien findet man in beiden Gräben große Geschiebeführungen und durch die hohe Reliefenergie sind beide murganggefährdet. Aufgrund dessen wurden in Küh- sowie Rotgraben diesbezüglich Verbauungen zur Ab- und Überleitung errichtet.

6. Diskussion

Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit lag darin, die gestellten Forschungsfragen beantworten zu können. Dafür wurde die Situation des Kühgrabens aufgrund menschlicher Aktivität auf Datenbasis von hochauflösenden Luftbildern, aufgenommen mittels UAV, und historischen Luftbildern analysiert. Die Prozessierung erfolgte mittels der SfM-Methode und die Analyse der Höhenänderung durch die DoD-Methode. Anschließend wurden die erstellten Höhenmodelle aus den historischen Luftbildern sowie die UAV-Daten mit denen des ALS verglichen, um mögliche Abweichungen zu eruieren. Eine Vegetationskartierung wurde als weitere Veränderungsanalyse durch menschliche Aktivität hinzugezogen und im Anschluss Küh- und Rotgraben auf ihre Unterschiede betreffend Baumaßnahmen und deren Begründung untersucht. Die Forschungsfragen konnten darauf wie folgt beantwortet werden:

1. Können zwischen den Aufnahmezeitpunkten von 1954, 1961, 1973, 1997, 2004, 2013, 2016 und 2020 Veränderungen der geomorphologischen Prozesse durch das Einwirken menschlicher Aktivität mithilfe von Fernerkundung festgestellt werden?

Diese Frage kann durch den Vergleich der erstellten Höhenmodelle aus UAV-Daten und historischen Luftbildaufnahmen beantwortet werden. Wie in Kapitel 1.1 schon erläutert, wurden Fernerkundungstechniken aufgrund der schweren Zugänglichkeit und der besseren Abbildung des Grabens gewählt. Durch das Erstellen von Punktwolken und der daraus entstandenen DEMs sowie durch die Bestandsaufnahme menschlicher Aktivität innerhalb des Grabenbereiches mittels der Sanierungspläne konnten die Veränderungen der geomorphologischen Prozesse durch das Einwirken menschlicher Aktivität festgestellt werden.

2. Welche Auswirkungen hat die menschliche Aktivität im Untersuchungsgebiet?

Diese Forschungsfrage wurde zur vollständigen Beantwortung in drei Unterfragen gegliedert:

2.1 Welche Bereiche des Kühgrabens haben sich aufgrund von menschlicher Aktivität verändert und wodurch ist diese Aktivität zu erkennen?

Die Antworten für diese Forschungsfrage ergeben sich aus der Untersuchung der Sanierungspläne, um herausfiltern zu können, in welchen Bereichen menschliche Aktivität stattgefunden und den Grabenbereich beeinflusst hat. Auch können dadurch und mithilfe des Managementplans des Nationalparks Gesäuse (2012) sowie der Masterarbeit von Skacel (2013) die genauen ingenieurbiologischen und bautechnischen Maßnahmen lokalisiert und in ihrer Größe und Notwendigkeit identifiziert werden.

2.2 Können Veränderungen in der Höhe festgestellt werden und können diese rein auf menschliche Aktivität zurückzuführen sein?

Veränderungen in der Höhe können durch den DoD-Vergleich festgestellt werden. Es wurde zwar das Untersuchungsgebiet in einzelne Detailgebiete aufgeteilt, um nur von Menschen beeinflusste Teile zu betrachten, dennoch können die Höhenänderungen, beispielsweise innerhalb der Verbauung in

Form von Weideflechtzäunen, nicht rein auf menschliche Aktivität zurückzuführen sein, da die erosiven Prozesse dennoch bei der Steilheit und dem Lockersediment, trotz der Eindämmung, weiter vonstattengehen. Die Höhenänderungen innerhalb des Grabenbereiches, in dem keine bautechnischen Maßnahmen gesetzt wurden, werden zwar von diesen Maßnahmen an den Hangbereichen beeinflusst, doch finden im Grabenbereich weitere gravitative Bewegungen aus den oberen Teilen des Grabens statt, die zur Verschiebung von Sediment und damit zur Höhenänderung führen.

2.3 Wie wurde die Vegetation im Grabenbereich durch menschliche Aktivität verändert?

Die Vegetationsveränderung konnte im Kapitel 5.4 durch die Detailgebietskartierung dargestellt werden. Die Vegetation wurde durch menschliche Aktivität größtenteils positiv beeinflusst, da durch die ingenieurbioologischen Maßnahmen die Vegetationsbedeckung, vor allem in den Hangbereichen, vergrößert wurde. Negativ wirkte sie sich durch das Abholzen von bestehender Vegetation im Zuge des Setzens der ingenieurbioologischen Maßnahmen aus. Teils musste schon vorhandene Vegetation für die Setzung dieser Maßnahmen weichen, doch wurde durch andere wieder besetzt.

Schwächen der Datenerfassung durch UAVs finden sich in den rechtlichen Einschränkungen bei der Befliegung, in den technischen Einschränkungen im Vergleich zu Flugzeugen (erklärt in Kapitel 3.1), der Abhängigkeit von Umwelteinflüssen und der Topographie aufgrund der geringen Flughöhe. All diese Einschränkungen haben Auswirkungen auf die Auflösung und somit die Qualität des Ergebnisses. Trotzdem überwiegen die Stärken, da trotz dieser Einschränkungen eine hohe geometrische Auflösung und eine hohe Punktdichte erzielt werden kann und auch der Kostenfaktor und der grundsätzlich flexible Einsatz wie z.B. bei durchgehender Wolkenbedeckung oder unzugänglichem Gelände für diese Art der Datenaufnahme sprechen. Diese Möglichkeiten zeigen sich vor allem in übersteilten Gebieten, da aus den UAV-Daten entsprechend dichte Punktwolken generiert werden können und diese somit für ein präziseres Ergebnis sorgen.

Unsicherheiten in der Aufnahme und Prozessierung der UAV-Daten traten dadurch auf, dass bei der Befliegung keine GCPs im Feld eingemessen wurden, sondern die Georeferenzierung der Aufnahmen mithilfe des Digitalen Atlas Steiermark erfolgte. Da die Zoomstufe auf einen Maßstab von 1:1000 bei dessen Luftbildern begrenzt ist, können die gesetzten Tie Points in den selbsterfassten Daten dadurch in ihrer Genauigkeit abweichen. Die Schattenbereiche in den UAV-Aufnahmen und historischen Luftbildern sind Bereiche mit großen Unsicherheiten.

Die Einschränkungen bei der Verwendung der historischen Luftbilder liegen darin, dass das Untersuchungsgebiet im Jahr 1973 nicht vollständig abgedeckt wird und die vier Aufnahme des Jahres 1961 nicht für eine Prozessierung ausreichen. Bei der Prozessierung der übrigen historischen Luftbilder treten ebenfalls Unsicherheiten auf. Diese entstehen, gleich wie bei den UAV-Daten, durch die indirekte Georeferenzierung durch Tie Points mittels des Digitalen Atlas Steiermark. Hierbei wird auch die Verfügbarkeit von historischen Luftbildern im Digitalen Atlas zum Hindernis, da diese nur bis zu einem Zeitraum von 1994-2001 reichen und somit die Findung von gleichen Merkmalen in den älter datierten historischen Luftbildern dieser Arbeit erschweren.

Die Kombination aus manueller und automatischer Georeferenzierung der einzelnen Detailgebiete hat zur Folge, dass die meisten Passpunkte kontrolliert gesetzt werden, jedoch nicht alle einer Überprüfung unterzogen wurden und so Ungenauigkeiten generiert werden können. Die manuelle Georeferenzierung besitzt den Vorteil, dass jene Punkte, welche gesetzt werden, mit hoher Wahrscheinlichkeit passgenau sind, jedoch fallen die Passpunkte in ihrer Anzahl deutlich geringer aus.

Auch die Verwendung der Anpassungstransformation hat zur Folge, dass diese versucht, alle Passpunkte miteinzubeziehen. Hierbei kann laut ESRI (2021c) keine lokale Genauigkeit garantiert werden und dies ist somit ebenfalls als potentielle Fehlerquelle anzuführen.

Die Verwendung der kommerziellen Software Agisoft birgt die Unsicherheit, dass der exakte Workflow und die eingesetzten Algorithmen nicht bekannt sind und es sich somit um ein Blackbox-System handelt. Dadurch wird das Verständnis von Methoden und das Einordnen von Unsicherheiten in der Verwendung der Software erschwert.

Die Analyse der Höhenänderung mit der DoD-Methode erwies sich als passend für die ausgewählten Detailgebiete des Untersuchungsgebiets, da keine Bereiche mit

senkrechten oder vertikalen Strukturen zu finden sind, bei denen diese Methode nicht angewendet hätte werden können. Um die Ergebnisse der einzeln prozessierten Jahre vergleichen zu können, mussten alle auf die gleiche Auflösung gebracht werden, was durchaus eine Einschränkung darstellt, da z.B. die UAV-Daten von einer hohen Auflösung von ca. 6 cm auf 34,6 cm geresampled werden mussten. Die Interpretation der Ergebnisse in Kombination mit den historischen Luftbildern wird durch die Qualität dieser beeinflusst. Verschiedene Lichtverhältnisse wie Überbelichtung oder Schattenwurf erschweren eine Unterstützung der Interpretation durch visuelle Vergleiche.

Die Vegetationskartierung ist ebenfalls von der Qualität der historischen Luftbilder abhängig, da diese rein visuell erfolgte. Schwierigkeiten zeigten sich darin, Verbauungen im Grabenbereich durch Überbelichtung deutlich zu erkennen oder die Straßenbereiche, welche vom Schatten des Waldbestandes überdeckt wurden, exakt einzuzeichnen. Die Unterscheidung zwischen Rekultivierungsmaßnahmen und vorherrschender Vegetation wurde aufgrund von zeitlichen Veränderungen angenommen und kann teilweise zu einem Verschwimmen der Klassen führen.

Beim Vergleich mit den offiziellen ALS- Daten des Land Steiermark wird auch deutlich, dass die geringen Flughöhen der UAV-Daten eine sehr dichte Punktwolke als Ergebnis liefern. Nach der Prozessierung zu einer verdichteten Punktwolke entstehen am Beispiel von Flug Nr. 2 etwas mehr als 234 Millionen Punkte. Das würde auf die gesamte Fläche gerechnet einen Mittelwert von 924 Punkten/m² ergeben. Die Metadaten des Land Steiermark geben eine Punktdichte von mindestens 4 Punkten/m² unter 2000m Seehöhe und mindestens 2 Punkten/m² über 2000m Seehöhe für das 1m DEM an (GIS Steiermark 2021). Natürlich sind auch an dieser Stelle die Unsicherheiten der UAV-Daten zu erwähnen, da diese Werte über den gesamten Bereich gemittelt sind und diese Zahlen im steileren Grabenbereich deutlich geringer ausfallen dürften. Außerdem handelt es sich hier um einen weiteren Prozessierungsschritt in Agisoft Metashape, welcher die originale Punktwolke verdichtet, weshalb es hier genauso zu Abweichungen kommen kann.

Die Verschneidung der Daten verschiedener Aufnahmesysteme mit verschiedenen Methoden bringt von vornherein Unsicherheiten und Einschränkungen mit sich. Diese können durch genaues Arbeiten und Verständnis für die einzelnen Prozesse auf ein Minimum reduziert werden.

Einschränkungen gab es ebenfalls in Bezug auf die Rechenleistung der verwendeten Hardware. Durch die Möglichkeit, einen leistungsstarken Rechner der Universität Graz nutzen zu können, konnten die einzelnen Jahre mit der Einstellung „Ultra High Quality“ gerechnet werden. Weitere, weniger rechenintensive Analysen konnten auf der eigenen Hardware durchgeführt werden.

7. Fazit

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Ziele dieser Arbeit erreicht und die Forschungsfragen beantwortet werden konnten. Es konnte festgestellt werden, dass die bautechnischen und ingenieurbioologischen Maßnahmen den geomorphologischen Prozessen im Untersuchungsgebiet entgegenwirken, beziehungsweise diese eindämmen und verlangsamen. Zwischen den verschiedenen Aufnahmezeitpunkten konnten dadurch deutliche Veränderungen des Grabens durch das Einwirken menschlicher Aktivität festgestellt werden. Diese Veränderungen konnten durch die UAV-Daten und die Prozessierung von historischen Luftbildern erfasst und durch den DoD-Vergleich analysiert werden. Dadurch konnte festgestellt werden, dass die Hangbereiche, welche durch ingenieurbioologische und die Hangfußbereiche, welche durch bautechnische Maßnahmen stabilisiert wurden, weniger Änderungen im Vergleich zu den Jahren ohne gesetzte Maßnahmen zeigen.

Die Wahl der Methoden stellte sich für das Untersuchungsgebiet und für die angestrebten Ziele als passend heraus. Die vorangegangene Methode der Literaturrecherche bildete die Basis des Prozessverständnisses und wurde zur Grundvoraussetzung für alle folgenden Arbeitsschritte. Die Verschneidung der unterschiedlichen Aufnahmesysteme, von neu aufgenommenen UAV-Daten mit historischen Luftbildern im Vergleich mit den ALS-Daten stellt einen wertvollen Teil dieser Arbeit dar und konnte zu einer fundierten Aussage über die Auswirkungen menschlicher Aktivität auf die geomorphologischen Prozesse des Kühgrabens führen. Die Vegetationskartierung ergab einen Mehrwert der Veränderungsanalyse, da Veränderungen über die Jahre so deutlich dargestellt werden konnten, welche sich durch die Ausbreitung der Rekultivierungsmaßnahmen menschlichen oder natürlichen Einflusses äußern. Der Vergleich des Kühgrabens mit dem Rotgraben brachte Klarheit

über die Unterschiede in den Sanierungsmaßnahmen der jeweiligen Gräben und führte zu der Erkenntnis, dass die Unterschiede in der Geologie der ausschlaggebende Faktor für die unterschiedlich getroffenen Maßnahmen sind.

Basierend auf den Ergebnissen kann zu dem Schluss gekommen werden, dass sich UAV-Daten sehr gut für die Veränderungsdetektion eignen, in diesem Fall aufgrund der Kombination mit historischen Luftbildern mit niedrigerer geometrischer Auflösung und längeren zeitlichen Abständen nur größere Änderungsraten bestimmt werden können.

Die bisher getätigten Maßnahmen vermindern die Schadwirkung deutlich, doch für ein weiteres Eindämmen der geomorphologischen Prozesse des Kühgrabens müssen die gesetzten Maßnahmen zukünftig weiter instand gehalten, teilerneuert oder erweitert werden. Weitere ingenieurbio-logische Maßnahmen in noch unverbauten Hangbereichen könnten angedacht werden, da diese weiterhin durch das Abbrechen der Geländekanten und das Nachrutschen von Sediment in den Grabenbereich große Mengen an Lockersediment bereitstellen. Die massive Geschiebeführung in Kombination mit den gravitativen Massenprozessen beeinflussen die Maßnahmen bei den Hangfußbereichen deutlich negativ, indem sie diese verformen und sogar verschieben.

Quellverzeichnis

Literatur:

Ampferer O. (1935): Geologische Karte der Gesäuseberge. Verlag der Geologischen Bundesanstalt Wien

Colomina I., Molina P. (2014): Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 92, S. 79-97.

Ehrenfellner J. (2005): Entwicklung eines waldbaulichen Behandlungskonzepts am Beispiel der Einzugsgebiete Kühgraben und Rotgraben im Nationalpark Gesäuse, Diplomarbeit, Universität für Bodenkultur, Institut für Waldbau, Wien, 126 S.

Eisenbeiß H. (2009): UAV Photogrammetry, Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Zürich, 235 S.

Hasitschka J., Höbinger T., Kreiner D. (2014): Gesäuse - Landschaft im Wandel. Weng im Gesäuse, 216 S.

Hecke C., Jungmeier M. (2017): Dokumentation von Naturprozessen im Nationalpark Gesäuse Teil 3: Dynamische Lebensräume im Murgraben Kühgraben und an der Enns (Bereiche Schotterbänke Finstergraben und Räucherlboden) - Endbericht. Studie im Auftrag von: Nationalpark Gesäuse GmbH, Bearbeitung: E.C.O. Institut für Ökologie, Klagenfurt, 101 S.

Holzinger A., Haseke H., Stocker E. (2012): Managementplan Witterschutt und Geschiebe, Nationalpark Gesäuse, Weng, 101 S.

Höbinger T., Kreiner D. (2017): Fallbeispiele zum Landschaftswandel der letzten 150 Jahre im Nationalpark Gesäuse (Ennstaler Alpen, Steiermark, Österreich). In: Acta ZooBot Austria 154, S. 89-105.

Kammerer H. (2008): Biotopkartierung Gesäuse – Teilbericht Kartierungsbereich Küh- / Rotgraben, Stattegg, 29 S.

Lague D., Broduc N., Leroux J. (2013): Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laserscanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z). In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 82, S. 10-26.

Rascher E. (2020): Environmental sedimentology of mountain regions: human impact on sediment dynamics in unglaciated alpine catchments (Johnsbach Valley, Austria). Dissertation, Umwelt-, Regional- und Bildungswissenschaftliche Fakultät, Karl-Franzens-Universität, Graz.

Schöttl S. (2017): Das Potenzial von UAV-Daten zur Erfassung der Sedimentdynamik – Eine Fallstudie aus dem Nationalpark Gesäuse. Masterarbeit, Institut für Geographie und Raumforschung, Karl-Franzens-Universität, Graz.

Schröck L., Sulzer W. (2016): The Creation of an Airphoto Map of Kangchenjunga by Means of Historical Airborne Survey of Schneider/Kostka. In: Biennale Berchtesgaden.

Schürch P., Densmore A.L., Rosser N.J., Lim M., McArdell B.W. (2011): Detection of surface change in complex topography using terrestrial laser scanning: application to the Illgraben debris-flow channel. In: Earth Surface Processes and Landforms, Volume 36, 14, S. 1847–1859.

Siebert S., Teizer J. (2014): Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) System. In: Automation in Construction, Volume 41, S. 1-14.

Skacel M. (2013). Monitoring ingenieurbiologischer Maßnahmen im Kühgraben im Nationalpark Gesäuse unter Berücksichtigung geomorphologischer Prozesse, Masterarbeit, Universität für Bodenkultur, Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau, Wien, 98 S.

Smith M.W., Carrivick J.L., Quincey D.J. (2016): Structure from motion photogrammetry in physical geography. In: Progress in Physical Geography, Volume 40, 2, S. 247-275.

Stangl J. (2009): Gravitative Naturprozesse im Nationalpark Gesäuse. Diplomarbeit. Karl-Franzens-Universität, Institut für Geographie und Raumforschung, Graz, 156 S.

Toth C., Jozkow, G. (2016): Remote sensing platforms and sensors: A survey. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 115, S. 22-36

Werschonig E. (2008): Vegetationskundliche Untersuchung dreier aufgelassener Almen im Nationalpark Gesäuse: Aufnahme der Vegetation und Untersuchung der Sukzession auf der Egger-, der Ebersanger- und der Wolfbauernhochalm im steirischen Nationalpark Gesäuse. na.

Westoby M.J., Brasington J., Glasser N.F., Hambrey M.J., Reynolds J.M. (2012): 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. In: Geomorphology, Volume 179, S. 300-314.

Wildbach- und Lawinenverbauung (2002): Kollaudierungsoperat 2002. Kühgraben und Rotgraben 1989-2000. Verbauungsprojekt 1986. WLV Unteres Ennstal und Salzatal, Weng bei Admont, 9 S.

Zedlacher D. (1986): Technischer Bericht zum Verbauungsprojekt 1986, Arbeitsfeld: Kühgraben und Rotgraben. Forsttechnischer Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung, Sektion Steiermark, Gebietsbauleitung Unteres Ennstal und Salzatal. Admont

Internetquellen:

Agisoft (2015): Agisoft User Manual in der Version 1.2. Agisoft LLC, St Petersburg, 102 S. Abrufbar unter: https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_5_en.pdf , zuletzt geprüft am 13.01.2022

Austro Control (2020): Lufttüchtigkeits- und Betriebstüchtigkeitsanforderungen für unbemannte Luftfahrzeuge der Klasse 1. Austro Control, GZ: E-LFA910-02/02-20, 15.12.2020 / Rev. 4, 12 S. Abrufbar unter: https://www.austrocontrol.at/jart/prj3/ac/data/dokumente/LTH_LFA_ACE_067_v5_0_2021-10-15_111077.pdf , zuletzt geprüft am 13.01.2022

Austro Control (2021): EU-Regulativ. Abrufbar unter: https://www.dronespace.at/jart/prj3/dronespace/main.jart?rel=de&reserve-mode=active&content-id=1601679780870&baumfrage_id=1601679844722&antwort=nein#anchor , zuletzt geprüft am 14.11.2021

Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (Hg.) (2021): BEV Shop Plus. Abrufbar unter: https://www.bev.gv.at/portal/page?_pageid=713,1576332&_dad=portal&_schema=P_ORTAL , zuletzt geprüft am 19.11.2021

Digitaler Atlas Steiermark (Hg.) (2021a): Digitaler Atlas Steiermark. Höhendarstellung-Geländeinformation. A17 Landes- und Regionalentwicklung, Referat Statistik und

Geoinformation. Abrufbar unter:
<https://gis.stmk.gv.at/wgportal/atlasmobile/map/H%C3%B6hendarstellung%20-%20Gel%C3%A4ndeinformation/H%C3%B6hendaten-Download> , zuletzt geprüft am 19.11.2021

Digitaler Atlas Steiermark (Hg.) (2021b): Digitaler Atlas Steiermark. Klimatologie und Meteorologie. A17 Landes- und Regionalentwicklung, Referat Statistik und Geoinformation. Abrufbar unter:
[https://gis.stmk.gv.at/atlas/\(S\(kewaqw54unbtfjhgde4kw4n\)\)/init.aspx?karte=klimaatl&ks=das&cms=da&redliningid=crnyyqvu0pxnhv5fma5ohp2r&layout=atlas_gisstmk_legende&box=314185;5140790.5;655815;5318590.5&srs=32633](https://gis.stmk.gv.at/atlas/(S(kewaqw54unbtfjhgde4kw4n))/init.aspx?karte=klimaatl&ks=das&cms=da&redliningid=crnyyqvu0pxnhv5fma5ohp2r&layout=atlas_gisstmk_legende&box=314185;5140790.5;655815;5318590.5&srs=32633) , zuletzt geprüft am 19.11.2021

Environmental Systems Research Institut (ESRI) (2021a): Weltweite Straßenkarte. Datengrundlage: Esri, DeLorme, HERE, USGS, Intermap, iPC, NRCAN, Esri Japan, METI, Esri China (Hongkong), Esri (Thailand), MapmyIndia, Tomtom. Abrufbar unter:
<https://www.arcgis.com/home/item.html?id=3b93337983e9436f8db950e38a8629af>,
zuletzt geprüft am 19.11.2021

Environmental Systems Research Institut (ESRI) (2021b): „Grundlagen für die Georeferenzierung eines Raster-Datsets“ in ArcGIS Desktop Help 10.7.1. Abrufbar unter:
<https://desktop.arcgis.com/de/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/fundamentals-for-georeferencing-a-raster-dataset.htm#GUID-E0959E92-489D-4956-BF2B-B50170242E22>, zuletzt geprüft am 19.11.2021

Environmental Systems Research Institut (ESRI) (2021c): Überblick über Georeferenzierung. Abrufbar unter:
<https://pro.arcgis.com/de/pro-app/latest/help/data/imagery/overview-of-georeferencing.htm>, zuletzt geprüft am 19.11.2021

GIS Steiermark (Hg.) (2021): Geodatenkatalog. Airborne Laser Scanner (ALS) Daten – Digitales Geländemodell 1m. abrufbar unter:
<https://gis.stmk.gv.at/geoportal/catalog/search/resource/details.page?uuid=%7B7ad93576-fd1f-4b32-a8a0-22ccbfb5b465%7D>, zuletzt geprüft am 19.11.2021

Hydrographischer Dienst Steiermark (Hg.) (2021): Wegenet – Stationsdaten. Abrufbar unter: <https://wegenet.org/portal/>, zuletzt geprüft am 13.10.2021

Nationalpark Gesäuse GmbH (Hg.) (2021): Klima und Wetter im Gesäuse. Abrufbar unter: <https://bak.nationalpark.co.at/de/component/content/article/52-naturraum/579-klima-und-wetter-im-gesaeuse>, zuletzt geprüft am 13.10.2021

RIS (2016): Rechtsinformationssystem Bundeskanzleramt, Luftfahrtgesetz § 24. f., Abrufbar unter: <https://www.ris.bka.gv.at/> , zuletzt geprüft am 14.11.2021