



UNIVERSITÄT FÜR BODENKULTUR WIEN

Masterarbeit

Veränderung der Landbedeckung im Einzugsgebiet des Rhein in Vorarlberg

verfasst von

Thomas BOZZETTA, BSc

im Rahmen des Masterstudiums

Landschaftsplanung und Landschaftsarchitektur

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Wien, Juni 2022

Betreut von:

Ao.Univ.Prof.ⁱⁿ Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Susanne Muhar
Institut für Hydrobiologie und Gewässermanagement
Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt

Ich erkläre eidesstattlich, dass ich die Arbeit selbständig angefertigt habe. Es wurden keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Formulierungen und Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Diese schriftliche Arbeit wurde noch an keiner Stelle vorgelegt.

Wien, Juni 2022

Thomas BOZZETTA (eigenhändig)

Inhaltsverzeichnis

1 Hintergrund.....	1
2 Wissenschaftliche Fragestellung und Hypothesen.....	4
3 Untersuchungsgebiet.....	9
3.1 Naturraum.....	10
3.1.1 Beschreibung der historischen und aktuellen Flussmorphologie.....	11
3.1.1.1 Bregenzer Ache.....	11
3.1.1.2 Ill.....	14
3.1.1.3 Rhein.....	17
3.2 Wirtschafts- und Siedlungsraum.....	19
4 Grundlagendaten.....	21
4.1 Historische Landbedeckung.....	21
4.2 Aktuelle Landbedeckung.....	22
4.3 Überflutungsgebiete bei HQ300.....	23
4.3.1 Aktuelle Überflutungsgebiete.....	23
4.3.2 Historische Überflutungsgebiete.....	24
4.4 Digitales Höhenmodell.....	24
5 Methodik.....	25
5.1 Historische Landbedeckung.....	25
5.2 Aktuelle Landbedeckungsklassen.....	27
5.3 Hochwassergefährdungszonen.....	28
5.3.1 Fließgewässerfehler.....	29
5.3.2 Aktuelle Hochwassergefährdungszonen.....	31
5.4 Schritte zur Analyse des Landschaftswandels.....	31
5.4.1 Analyse des Landschaftswandels im HQ300-Einflussbereich.....	31
5.5 Beobachtungsmaßstab.....	32
6 Resultate.....	33
6.1 Flächenbilanz Untersuchungsgebiet.....	33
6.2 Höhenauswertungen.....	39
6.2.1 Flächenbilanz nach Höhenstufen.....	39
6.2.2 Graduelle Höhenauswertung ausgewählter Landbedeckungen.....	44
6.3 Transformation - Was wurde aus der historischen Landbedeckung?.....	46
6.4 Flächenbilanz Überflutungsgebiet bei HQ300.....	50
6.4.2 Transformation im HQ300-Überflutungsraum.....	55
6.4.3 Veränderung des HQ300-Überflutungsraumes.....	58
6.4.4 Bedeutung der Rheinregulierung für den HQ300- Überflutungsraum.....	60
6.4.5 Höhenauswertungen des Überflutungsraumes.....	61
7 Diskussion der Resultate.....	67
7.1 Bemerkungen zur Datenbeschaffenheit.....	67
7.2 Veränderungen der Landbedeckung im österreichischen Rhein-Einzugsgebiet (vgl. Forschungsfrage i).....	70
7.3 Landbedeckungswandel im hochalpinen Raum (vgl. Forschungsfrage ii).....	75

7.4 Auswirkungen auf das Hochwasserabflussverhalten (vgl. Forschungsfrage iii)	80
8 Zusammenfassung und Schlussfolgerung	89
Glossar:	92
Tabellen	93
Quellen	93

Kurzfassung

Diese Masterarbeit wurde im Rahmen des Earth System Sciences (ESS) Projekts „Integrated Flood Risk Management in Mountain Areas: Assessing Sectoral Interdependencies, Conflicts and Options for Policy Coordination“ – kurz PoCo Flood erstellt. Basierend auf der Digitalisierung des Franziszeischen Katasters mittels GIS wurde die Landbedeckung im Rhein-Einzugsgebiet um 1857 mit der aktuellen verglichen. Die größten Veränderungen in den letzten 160 Jahren bilden der Rückgang der Äcker um 80% (-115km²) und die gut Verneunfachung der Siedlungsflächen. Aufgrund des Gletscherrückgangs dehnte sich das unbewachsene Ödland über 2500müA um 22km² (+111%) aus. Langsamer als der Gletscherschwund (-42km² bzw. -87%) voranschreitet, wandert das Grünland (rund 4km²) in Ödlandflächen ein. Der Anstieg der mittleren Höhe der locker bis dicht bestockten Flächen um 92m sowie deren Zuwachs zwischen 1500 und 2500müA (+35% bzw. +66km²) ist nicht allein dem Klimawandel, sondern auch der Bewirtschaftungsaufgabe von Grenzertragsflächen geschuldet. Aufgrund zahlreicher Regulierungen sind die Fließgewässer stark morphologisch beeinträchtigt und in ihrer Fläche um 57% auf 17km² zurückgegangen. Trotz des Rückgangs der HQ300-Überflutungsfläche (-69km²) sind heute 8,5-mal so viele Siedlungsgebiete vom HQ300 betroffen als 1857. Die Abnahme der hydraulischen Rauigkeit und Infiltrationsfähigkeit der Böden im HQ300-Gebiet spiegelt sich im Rückgang der Wälder (-8%) und Feuchtgebiete (-80%) wider. Als Folge sind eine Anhebung des Abflussscheitels und steilere Verläufe der Abflussganglinie und damit eine Änderung des Hochwasserabflussverhaltens zu erwarten. Die Ergebnisse zum Verlust dynamischer Fließgewässer, Gletscherschwund und Bodenversiegelung bieten eine wertvolle Grundlage, um die Veränderung des Hochwasserrisikos durch Landnutzungs- und Klimawandel sowie durch Flussregulierungen umfassend zu diskutieren.

Abstract

This master thesis was created within the framework of the Earth System Sciences (ESS) project 'PoCo Flood - Integrated Flood Risk Management in Mountain Areas: Assessing Sectoral Interdependencies, Conflicts and Options for Policy Coordination', which aims to provide scientific solution bases for policymakers in order to mitigate flood risk. Based on the digitization of the 'Franziscan Cadastre' from 1857 in GIS, historical land cover in the Austrian Rhine catchment was compared with the land cover of 2016. The largest changes in land cover over the last 160 years are the decline in arable land by 80% (-115km²) and the more than 9-fold increase in settlement area. Due to the retreat of the glaciers, there was an increase in unvegetated wasteland above 2500masl (+111% or +22km²). Much slower than the glacial retreat (-42km² or -87%), the grassland (around 4km²) migrates into newly exposed wasteland areas. The ascent of the loosely to densely tree-covered areas by an average of 92m and their increase between 1500 and 2500masl (+35% or +66km²) can be attributed to both climate change and succession in formerly agriculturally used grassland. Due to numerous hydraulic measures, the watercourses have been severely morphologically affected and their area has decreased by 57% to 17km². Despite the decrease (-69km²) of the areas inundated at 300-year floods (HQ300 zones), nowadays 8.5 times as many settlement areas than in 1857 are affected by the HQ300. The decrease in hydraulic roughness and infiltration capacity is reflected by the decline in forests (-8%) and wetlands (-80 %) in the HQ300 area. As a result, an increase in the discharge peak as well as steeper hydrograph runs and thus changes in flood discharge behavior can be expected. The results on the loss of dynamic rivers, glacial retreat and soil surface sealing provide a valuable basis for comprehensively discussing the change in flood risk due to land use and climate change as well as hydraulic measures.

1 Hintergrund

Die Landbedeckung ist unzertrennlich mit der menschlichen Beeinflussung bzw. Überformung der Natur verbunden. In Zeiten bevor schwere landwirtschaftliche Maschinen zum Einsatz kamen, stellte sich die Landnutzung völlig anders dar, als seit der Industrialisierung bzw. der Erfindung der Dampfmaschine [Erb et al 2008]. In einem globalen Kontext wird heute vom Anthropozän gesprochen, einem Zeitalter von einem derart hohen Einwirken des Menschen auf natürliche Prozesse, dass er, der Mensch, namensgebend dafür wurde [Chowdhury et al. 2019].

Die Dimension des industriellen Fischfangs [Jackson et al. 2001] [Zhou et al. 2014] oder die fortschreitende Ausrottung von Großsäugetieren [Davidson et al. 2017] [WWF 3.2021] – der Umfang und die Geschwindigkeit der Zerstörung von ursprünglichen Regenwäldern im Amazonas [WWF 2018], die Habitatfragmentierung durch Landnutzungswandel [Fahrig 2003] [Fazey et al. 2005] oder der jährliche Bodenverbrauch in Österreich [UBA 2019] sind nur einzelne Phänomene dieses menschlichen Wirkens in aktueller Zeit. Viele Untersuchungen belegen die Wirkung des Menschen auf Ökosysteme, Diversität und die globale Veränderung natürlicher Bedingungen. Im Fokus der Untersuchungen standen bisher aufgrund des hohen Grades an Komplexität, Diversität und Dynamik oft auch die Fließgewässer [Schmidt-Kloiber et al. 2019]. Sie galten seit jeher als Lebensadern, entlang welcher sich günstige Bedingungen für Landwirtschaft ergaben, Rohstofftransporte stattfanden, sich Handelsrouten etablierten und sich Siedlungen entwickelten [Morozova 2005] [Shirokova & Likhacheva 2020] [Encyclopedia Britannica 3.2021] [Naturpark Karwendel 3.2021]. Der konstante Bedarf an der Ressource Wasser ließ jedoch auch den Nutzungsdruck auf diese Gewässer rasant steigen. Regulierungen von Fließgewässern und Drainage von Moor und Auegebieten waren eine Möglichkeit, mehr urbare Fläche zu generieren und die Natur vermeintlich in ihre Schranken zu weisen.

Im 18. und 19. Jahrhundert wurden vielerorts weitreichende Regulierungseingriffe an großen Fließgewässern vorgenommen. Als ansehnliche Leistung federführender Ingenieure wurden die lange als unbezwingbar angesehenen Naturgewalten weit verzweigter Flusssysteme eingedämmt und begradigt mit der Folge einer Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit, Sohleintiefung und Grundwasserabsenkung [Zerbe 2019]. Diese Maßnahmen stellen einen tiefen Eingriff in die Ökologie und Dynamik der Flussläufe dar, die damals mit Sicherheit unterschätzt wurde. Mit der Dynamik hat auch die Vielfalt an Lebensräumen in den Auen stark abgenommen. Der Nutzungswandel und die damit einhergehende Fragmentierung der Flusssysteme kann als wesentlicher Faktor für den fortschreitenden Biodiversitätsverlust angesehen werden [Tockner & Stanford 2002].

Im Laufe des letzten Jahrhunderts ließen anthropogene Störfaktoren neben den bestehenden Umweltfaktoren den Handlungsbedarf immanent werden. Stand anfänglich die Sanierung der Gewässergüte im Vordergrund, so wechselte der Fokus in letzter Zeit zunehmend auf die Verbesserung der hydromorphologischen Defizite von Fließgewässern. Interdisziplinäre Ansätze und konstruktive Zusammenarbeit, ehemals stark abweichende Zielsetzungen von WasserwirtschaftlerInnen und ÖkologInnen, sind heute Stand der Technik [Jungwirth et al. 2003].

Diese Art der Zusammenarbeit findet nun auch Niederschlag in der nationalen Gesetzgebung und europaweiten Richtlinien. Viel Wissen soll nun in rechtlich bindende Vorgaben gegossen werden. Zum Beispiel sollen Fließgewässer in ihren hydromorphologischen Ansprüchen in der Raumplanung mitgedacht und Überflutungsräume aktiv eingeplant werden. Den Flüssen und ihren Lebensräumen muss in der Raumplanung genauso Platz eingeräumt werden, wie dem Menschen mit seinen Bedürfnissen. Zu diesem interdisziplinären Aufgabenbereich haben sich verschiedene Projekte etabliert, u.a. PoCo Flood:

Das Forschungsprojekt PoCo Flood ist durch eine interdisziplinäre wissenschaftliche Zusammenarbeit von Raumplanung und ländlicher Neuordnung, Hydrologie und Wasserwirtschaft, Agrarwissenschaft, Flussmorphologie und Politikwissenschaft gekennzeichnet. Es wurde von einer Forschergruppe um Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Walter Seher im Jahr 2018 beantragt und von der ÖAW (Österreichische Akademie der Wissenschaften) im Rahmen des „Earth System Sciences“ Forschungsprogrammes genehmigt. Wie der Projekttitle „Integrated Flood Risk Management in Mountain Areas: Assessing Sectoral Interdependencies, Conflicts and Options for Policy Coordination“ vermuten lässt, ist es Ziel des Projektes, die Herausforderungen und Hemmnisse sektoraler Koordination in der Hochwasserschutzpolitik im Alpenraum aufzuzeigen und in einem interdisziplinären Ansatz Lösungsansätze zu erarbeiten. Das Projekt soll bereichernd und ergänzend im Kanon laufender, internationaler Forschung (Panta Rhei, PLANALP, Interpraevent Society, ISCAR, UNISDR) den alpinen Raum betreffend im aktuellen Paradigmenwechsel vom reinen Hochwasserschutz hin zum integrierenden Hochwasserrisikomanagement (IFRM) eingebettet werden, mit der Absicht der wissenschaftlichen Unterstützung politischer Entscheidungsfindung [Löschner et al. 2019].

Die Untersuchung der Problematik erfolgt in drei Fallstudien: ‚Hochwasserrisiko in den Quellgebieten‘ - im Spannungsfeld von Energiewirtschaft und Hochwasserspitzen, ‚Hochwasserrückhalt auf landwirtschaftlichen Flächen‘ - der Ermittlung von Retentionspotential in agrarisch genutztem Raum sowie ‚Hochwasserschutz und Siedlungsraum‘ - zukunftsfähige Zusammenführung von Hochwasserschutzmaßnahmen und Raumordnungspolitik.

Das Forschungsprojekt widmet sich unumgänglich auftretenden Interessenskonflikten zwischen den raumrelevanten Stakeholdern, vom stetig wachsenden Siedlungsraum bis zur Energie- und Landwirtschaft und den vielfältigen Anforderungen der Ökologie, welche sich nur von einer steuernden Raumplanung zusammenführen lassen. Diese Raumplanung muss auch dem Einzugsgebiet entsprechend harmonisierende Hochwasserschutzmaßnahmen mitdenken [Haidvogel et al. 2018].

Zum Zwecke eines besseren Verständnisses der Problemstruktur im historischen Kontext sowie als Basis für die Erstellung von Wasserbilanzmodellen für Flusseinzugsgebiete, ist die Rekonstruktion der historischen Landbedeckung essentiell [Pohl 2020]. Diese Rekonstruktion im Rahmen des Projektes PoCo Flood folgt dem Vorbild von bereits vorhandenen Studien an der Traisen in St. Pölten [Haidvogel et al. 2018], an der Donau im Machland oder in Wien [Hohensinner et al. 2008, 2014]. Das Arbeitspaket zur Rekonstruktion der historischen

Landbedeckung leitet DI Dr. Severin Hohensinner, welcher auch diese Masterarbeit betreut und dazu Grundlagendaten aufbereitet und zur Verfügung gestellt hat.

Die im Zuge dieser Arbeit erfolgte Vektorisierung des Kartenmaterials im österreichischen Rhein-Einzugsgebiet leistet somit einen kleinen Beitrag für ein besseres Verständnis der historischen Verhältnisse und steht in leicht verarbeitbarer Form als GIS-Layer für zukünftige Untersuchungen und Maßnahmen zur Verfügung.

2 Wissenschaftliche Fragestellung und Hypothesen

i. Was sind die größten Veränderungen bezüglich der Landbedeckung im Einzugsgebiet des Rheins in den letzten 160 Jahren?

Der Zusammenhang zwischen Landbedeckungswandel und Außerbetriebnahme agrarisch genutzter Flächen ist weltweit aus vielen Studien evident und wurde in vielerlei Hinsicht auf Ursachen und Wechselwirkungen untersucht [Meyer & Turner II 1994] [Poyatos et al. 2003] [Rutherford et al. 2008] [Cousins et al. 2015] [Plieninger et al. 2016].

Auch im Alpenraum geht der Ablösung von Land- und Forstwirtschaft, durch neue Nutzungsformen mit einer Veränderung der Landbedeckung einher [Bätzing 2003]. Überalterung der Betriebsbesitzer sowie eine Abnahme der landwirtschaftlichen Betriebe und eine flächige Reduktion der intensiv genutzten Landwirtschaftsflächen haben einen Landbedeckungswandel eingeläutet [Tappeiner et al. 2006]. Die Konzentration aktueller Siedlungsentwicklung und Produktionsstätten erfolgt heute insbesondere auf Gunstlagen und hochproduktiven Flächen [Tasser & Tappeiner 2002], während abseitig liegende, maschinell ungünstig, oder nur durch hohen Arbeitsaufwand bewirtschaftbare Flächen aufgegeben werden, verwalden und eine Abnahme an Biodiversität erfahren [Giupponi et al. 2006] [Zimmermann et al. 2010]. Der Verlust wertvoller Synergien und Ökosystemservices ist dabei unbestritten [Power 2010].

Demnach wird von folgenden Hypothese ausgegangen: Aus einem Vergleich der Landbedeckung des gesamten österreichischen Einzugsgebietes des Rheins von 1857 und 2016 ist Verwaldung als Folge der Aufgabe landwirtschaftlicher Bewirtschaftung und Versiegelung einer vormals großteils agrarisch, nunmehr industriell und touristisch geprägten Wirtschaft als wesentlicher Trend zu erwarten. Dazu kann weiters vom Rückgang extensiv genutzter Flächen wie (Obst)Baumwiesen und Feuchtgebietsflächen sowie von Fließgewässern ausgegangen werden.

ii. Wie wirkt sich der Klimawandel auf die Landbedeckung im hochalpinen Raum aus?

Das hydrologische System – und als wichtige Kenngröße – der Abfluss, erfährt aktuell weitreichende Beeinflussung von verschiedenen Impulsen und Faktoren im Wasser- und Landmanagement, deren direktes Zusammenspiel noch nicht ausreichend erforscht ist [Hall & Perdigão 2021]. Beeinflussung erfahren hydrologische Trends auch durch den menschengemachten Klimawandel: von verändertem Niederschlagsregime, Beeinflussung von Evapotranspirationsfaktoren oder zeitlicher Verschiebung von Schneefall und Schmelzzeitpunkten [Gudmundsson et al. 2021]. Die Kombination dieser Einflussfaktoren kann beschleunigende Wirkung hervorbringen [Neupane & Kumar 2015] und die Auswirkungen des Klimawandels können gravierende Veränderungen des Abflusses auch für

Zonen mit sich bringen, für welche ursprünglich kaum negative Auswirkungen vorhergesagt wurden [Pervez & Henebry 2015]. Da der Alpenraum eine mannigfaltige Morphologie und einen durch wissenschaftliche Modelle schwierig fassbaren Strukturreichtum mit vielerart lokaler Ausnahmen und Phänomene hervorbringt, sind Aussagen, welche für den gesamten Gebirgsraum zutreffen, schwierig zu fassen [Gobiet et al. 2014]. Verschiedene meteorologische Phänomene können extreme Wetterereignisse im Alpenraum beeinflussen und verursachen [Haslinger et al. 2019]. Je nach Prädisposition der Region – ob niederschlags- oder schmelzwasserdominiert – können die Auswirkungen dabei zu gegenläufigen Resultaten führen [Brunner et al. 2019]. Geprägt sind diese Prozesse im Hochgebirge vom augenscheinlichen Rückgang der Gletscher [Zemp et al. 2015].

In des Untersuchungsgebietes ist dies etwa am Ochsentalgletscher, welcher in den letzten 170 Jahren einen Rückgang von 2,3km zu verzeichnen hat [Braumann et al. 2020], oder am unweit davon gut erforschten Jamtalferner, dessen Moränen der kleinen Eiszeit um die 2km von der heutigen Gletscherzunge entfernt sind [Fischer et al. 2019], eindrucksvoll belegbar. In weiterer Folge stark abschmelzender Gletscher verändert sich der Geschiebeeintrag [Comiti et al. 2019], als auch die Häufigkeit von Hangrutschungen/-brüchen [Cody et al. 2020] in paraglazialen Zonen. Die alpine Sedimentdynamik kann sich im Zuge verändernder Niederschlagsregimes vom flussbettdominierten zum hangneigungsdominierten Eintragsschwerpunkt verschieben [Misset et al. 2020], wobei diese Entwicklung regional sehr unterschiedlich ausfallen kann [Gariano & Guzzetti 2016] [Hirschberg et al. 2020] und auch stark vom Ausgangsgestein abhängt [Mulugetta Fratkin et al. 2020] [Cargill et al. 2021]. Die Wiederbesiedlung durch Vegetation ehemals vergletscherter Flächen erfolgt äußerst langsam [Fischer et al. 2019]. Die Gewinner dieser Erstbesiedlungen sind meist wenige Arten und die anfänglich auftretende Biodiversität nimmt mit der Zeit ab [Losapio et al. 2021]. Parallel dazu lassen möglicherweise auf anthropogen verursachte Dynamiken zurückzuführende Extremereignisse, wie Dürren und Hitzesommer [Büntgen et al. 2021] nicht nur ständig neue Spitzen der Gletscherablation auftreten, sondern schwächen bestehende Waldbestände, welche in steilem Gelände zur Stabilisierung der Hänge von besonderer Bedeutung sind [Brang et al. 2006] und führen zu gesteigerter Mortalität [Schuldt et al. 2020]. Die Folgen der Aufgabe von Jahrhunderte andauernder, die Landschaft in seiner heutigen Ausprägung formender Bewirtschaftung in hochalpinen Lagen spiegeln sich in der zukünftigen Landbedeckung wider [Rutherford et al. 2008] [Briner et al. 2012] [Angelstam et al. 2021]. Die vereinten Auswirkungen von Klimawandel und Landnutzungswandel sind in einem komplexen Zusammenhang mit einem fortschreitenden Verlust der Biodiversität verwoben [De Chazal & Rounsevell 2009] [Semmelmayer & Hackländer 2020].

Aus dem Kanon der Forschung lässt sich schlussfolgern, dass der Anstieg der Waldgrenze im österreichischen Rhein-Einzugsgebiet vermutlich nur eine geringe Rolle spielt und eher eine Extensivierung unrentabel zu bewirtschaftender Flächen widerspiegelt als klimawandelbedingte Einflüsse. Des Weiteren ist anzunehmen, dass trotz der vom Klimawandel beeinflussten, zusehends günstigeren Voraussetzungen für Vegetationsausbreitung in höheren Lagen, in den von Gletschern freigegebenen Bereichen unbewachsenes Ödland allmählich an Bedeutung gewinnt.

iii. Mit welchen potenziellen Auswirkungen im Hinblick auf das Hochwasserabflussverhalten ist aufgrund der klimawandel-, landbedeckungs- und regulierungsbedingten Veränderungen zu rechnen?

Die Auswirkungen des Klimawandels können am Besten durch erdumspannende Simulationen beschrieben werden. Modellierungen zeigen, dass in mittleren Breiten der Nordhalbkugel zur nächsten Jahrtausendwende das sommerliche Klima statt ein Viertel, ein halbes Jahr andauern wird [Wang et al. 2021]. Die einhergehenden sukzessiven Veränderungen der sich zeitlich verschiebenden Saisonalität des Abflusses sind bereits heute beobachtbar [Madsen et al. 2014]. Das Zusammenspiel von durch Klima- und Landbedeckungswandelbedingten Faktoren verstärkt die Auswirkungen auf die Hydrologie und das Abflussverhalten [Hejazi & Moglen 2008] und es ist mit erhöhter Überflutungswahrscheinlichkeit zu rechnen [Hoegh-Guldberg et al. 2018] [Schleussner et al. 2018] [Slater et al. 2021]. Dies kann in Ausnahmefällen durchwegs positive Nebenwirkungen mit sich bringen, wenn ehemals erosionsanfällige Landbedeckungen heute eine andere Landbedeckung aufweisen [Giri et al. 2019]. Das Gegenteil ist aber oft der Fall, wenn klimatische oder ökonomische Rahmenbedingungen die Aufgabe traditioneller Landwirtschaft veranlassen haben [Keiler et al. 2006] [Agnolotti et al. 2019] [Poratelli et al. 2020]. Parallel zur Aufgabe traditioneller Bewirtschaftung verdichtet sich das Siedlungsnetz in den Gunstlagen [Bätzing 2003]. Die dabei zunehmende Versiegelung der Böden geht mit einem erhöhten Überflutungsrisiko einher [Mejía et al. 2015] [Oudin et al. 2018] [Swain et al. 2020].

Die europäischen Fließgewässer haben ein reichhaltiges Erbe, was die Mitigation von Flutereignissen als auch die Nutzung der Ressource Wasser betrifft [Vörösmarty et al. 2010] [Wohl 2019]. Viele dieser Maßnahmen und Korrekturen galten seinerzeit als bahnbrechend und wegweisend. Heute sind die vollbrachten Regulierungsmaßnahmen und Leistungen des Flussbaus und Gewässermanagements differenziert zu betrachten. Sind in Österreich zum Einen substantielle Schritte im Feld der Energieressourcenbereitstellung getätigt worden und eine partielle Eindämmung der Überflutungsgefahr erreicht worden, so ist dies zum Anderen zumeist auf Kosten quantitativer und qualitativer morphologischer Verarmung der Fließgewässer und Feuchtgebiete geschehen [Tockner & Stanford 2002]. Besonders bei Extremereignissen sind vielgestaltige Strukturen entlang von Fließgewässern und in großflächigen Flussaugebieten von erheblichem Wert im Rückhalt von Hochwasserwellen und der temporalen chemischen Pufferung von Wasser und darin gelöster Stoffe [Milliman et al. 2008] [Schober et al. 2020].

In der Annahme, dass auch im vorarlbergischen Rhein Einzugsgebiet die im Alpenraum und auch europaweit erkennbaren Muster des Landbedeckungswandels als Folge voranschreitender Siedlungsentwicklung, des Landwirtschaftswandels und der wachsenden Bedürfnisse der Energiewirtschaft eingetreten sind, kann folglich von einem starken Defizit dynamischer fließgewässergeprägter Landbedeckungen (Auen mit Alt- und Seitenarmsystemen, dynamisch umgelagerten Flächen, überschwemmten Waldgebieten, Feuchtgebieten) ausgegangen werden. Es wird daher angenommen, dass im direkten Einflussbereich der Fließgewässer die im Hochwasserfall notwendigen, die nötige

hydraulische Rauigkeit und Infiltrationsfähigkeit aufweisenden Landbedeckungen in weit geringerem Maße vorhanden sind, als dies Mitte des 19. Jahrhunderts der Fall war. Als Resultat von Flussbegradigung und zunehmender Versiegelung puffernder Überflutungsflächen ist mit höheren Fließgeschwindigkeiten und höheren Abflussmengen innerhalb kürzerer Zeitspannen zu rechnen [McGrane 2016] [Schober et al. 2020]. Die räumliche Konzentration des Abflusses und damit potentiell höher ausfallenden Hochwasserwellen stellen ein höheres Hochwasserrisiko, z.B. durch Verklausungen, im Untersuchungsgebiet dar.

3 Untersuchungsgebiet



Abbildung 3.2: Alpenkonventionsgebiet, Österreichische Bundesländer & Untersuchungsgebiet

Das Project PoCo Flood begrenzt sich auf den durch die Alpenkonvention (vgl. Abb. 3.2) erfassten Bereich [Elmi et al. 2018]. Die Ausdehnung der geographischen Beobachtung dieser Arbeit - im Folgenden als ‚Untersuchungsgebiet‘ bezeichnet - erstreckt sich über das auf historisch österreichischem Hoheitsgebiet befindlichen Einzugsgebiet (EZG) des Rheins (vgl. Abb. 3.1). Die Abgrenzung desselben erfolgte auf Basis eines Geländemodells. Das Untersuchungsgebiet bildet nach heutiger Grenzziehung einen Großteil Vorarlbergs sowie das orografisch linke, somit schweizerische Flussufer des Rheins und ein geringeres Ausmaß an Flächen im Grenzbereich zum Tiroler Oberland im Südosten, zu Liechtenstein im Westen und zu Deutschland im Nordosten ab.

Im Sinne des river-scaling-concepts (RSC) sind aufeinanderfolgende down- und upscaling Prozesse notwendig, um den Zustand und das Potential eines Fließgewässers zu ergründen:

“The downscaling phase starts at the catchment-wide (continental–regional) scale. At this scale the possible development of the morphodynamics in the covered area is determined. Tectonics, geological processes, uplift, denudation rates, climate change, vegetation cover and relief energy are the essential processes.” [Habersack 2000, S. 54]

Mit obigem Zitat, soll ausgedrückt werden, dass hydrologischen und hydromorphologischen Analysen eine Untersuchung auf Einzugsgebietsebene vorauszusetzen ist. Eine isolierte Betrachtung eines einzelnen Fließgewässers einer gewissen Größe macht nur Sinn, wenn alle Zuflüsse ebenfalls untersucht werden, bzw. müssen punktuelle, lokale oder streckenbezogene Ausformungen der Fließgewässer auch im Kontext der übergeordneten Ebene betrachtet werden. Deshalb sind in der vorliegenden Arbeit nicht nur der Rhein, sondern alle bereits historisch erfassten Fließgewässer, welche in ihn münden, ebenfalls kartiert und untersucht worden – samt ihrer umgebenden Landbedeckung.

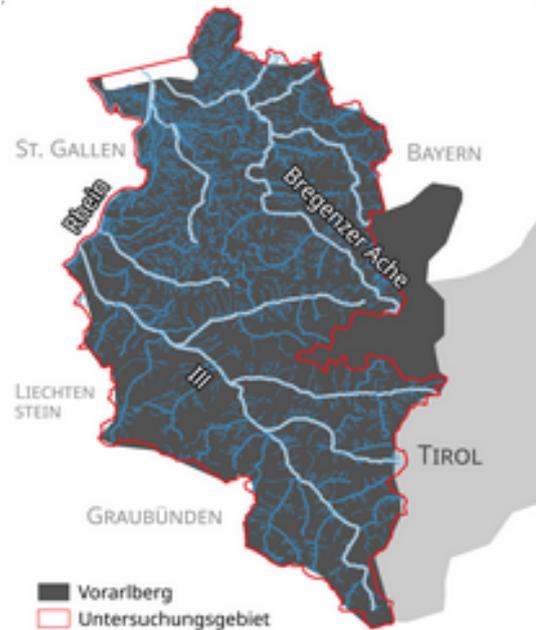


Abbildung 3.1: Untersuchungsgebiet (rot), österreichische Bundesländer (Grautöne), Fließgewässer im österreichischen Rhein Einzugsgebiet (Blautöne)

3.1 Naturraum

Die geologische Beschaffenheit des Untersuchungsgebietes kann als Treffpunkt von Ost- und Westalpen beschrieben werden. Hier tauchen die Westalpen unter die Ostalpen. Der Einteilung nach Gebirgs- und Klimazonen nach Baumgartner et al. [1983] zufolge liegt das Untersuchungsgebiet zum Großteil in den Nordalpen und in geringem Ausmaß in den westlichen Ostalpen. Somit ist ein reichhaltiges Mosaik an Gesteinsformationen im EZG anzutreffen.

Die ältesten Gesteine sind die metamorphen Kristalline (Gneise, Glimmerschiefer und Amphibolite) in der Silvretta. Das Silvrettamassiv ist zum Großteil durch die variszische Orogenese (vor ca. 300-400 Millionen Jahren) metamorph geprägt, weist jedoch auch druckbetonte Metamorphite auf, welche der kaledonischen Orogenese entstammen (Höhepunkt vor ca. 450 Millionen Jahren) [Nowotny et al. 1993]. Verwitterungsprozesse bildeten daraus die variszische Molasse, welche sich als schmales Band nördlich des Silvrettakristallin entlangzieht. Zwischenzeitliche vulkanische Aktivitäten und Sedimentationsprozesse bildeten heute im gesamten variszischen Grundgebirge anzutreffende zwischengelagerte Einsprengungen. Weiters findet man heute Gebirgsstöcke aus unterschiedlichen Kalksteinen, die als Ablagerungen im Tethys-Meer (vor ca. 100-240 Millionen Jahren) beträchtliche Mächtigkeiten aufbauen konnten. So sind Kalke des Rätikon, des Davennastockes oder des Lechquellengebirges den nördlichen Kalkalpen zuzuordnen, während die Flachwasserkalke der Falknis- und Sulzfluhdecke dem Penninikum zuzuordnen sind. Durch Auswaschung von kristallinen Sanden und Verbindung mit kalkhaltigem Material entstanden in tiefen Meeresbereichen die Gesteine der Flyschzone, welche heute einem vom Saminatal übers Großwalsertal und dem hinteren Bregenzerwald bis in das östliche Kleinwalsertal folgendem Band anzutreffen sind. Nördlich davon verläuft das breite Band des Helvetikum über weite Teile des Bregenzer Waldes bis zum Rheintal südlich Dornbirn. Die in einem Flachmeer gebildeten Gesteine sind großteils Kalke und Mergel und untergeordnet Sandsteine. In Berührungszonen der Flyschzone und des Helvetikum ist in Form hausgroßer Blöcke aus tonigen Grundmassen der Wildflysch anzutreffen. Die alpidische Gebirgsbildung führte schließlich zur Hebung der Alpen und der einhergehenden Ausformung einer Senke nördlich des Alpenbogens, deren Auffüllung die Schichten der Molassezone hervorbrachte, welche heute nördlich der Linie Dornbirn-Egg-Balderschwang das Grundgestein bilden [Friebe 2004].

Im Untersuchungsgebiet herrscht ein Niederschlagsregime mit einem ausgeprägten Maximum im Sommer vor und es kann zudem bis auf die südlich begrenzenden Gipfelzüge, welche den klimatisch inneralpinen Gebieten angehören, der atlantischen Klimazone zugeordnet werden [Baumgartner et al. 1983]. Durch die Lage am Alpennordrand und morphologische Ausbildung der weiten Öffnung des Rheintales nach NW, liegen im Untersuchungsraum die niederschlagsreichsten Zonen Österreichs mit einem mittleren Niederschlag von 1880mm/Jahr [Fenz 2014].

Die gesamte untersuchte Fläche beträgt 2.364km² und erstreckt sich von 395m am Bodensee bis 3312m ü. Adria, mit ihrem höchsten Punkt am Piz Buin in der Montafoner Silvretta. Sie

macht 4/5 der Gesamtfläche Vorarlbergs aus. Diese Fläche entwässert über den Rhein in die Nordsee, während das verbliebene Fünftel und somit der in dieser Arbeit nicht untersuchte Teil Vorarlbergs - das Einzugsgebiet des Lechs - über die Donau ins Schwarze Meer abfließt.

Das gesamte Einzugsgebiet des 1250km langen Rheins beträgt 185.260km². Der mittlere Abfluss über die gesamte Fließstrecke beträgt 2300m³/s [Uehlinger et al. 2009]. Von seiner Quelle in der Schweiz bis zur Mündung in den Bodensee wird er auch als Alpenrhein bezeichnet und vereinigt von der Quelle am Graubündner Tomasee bis zur Mündung in den Bodensee ein Einzugsgebiet von 6.299km². Die gesamte Fließstrecke des Rheins in Vorarlberg beträgt 26km, wobei der Alpenrhein bis zum Eintritt in das Untersuchungsgebiet bereits 65km und einen Höhenunterschied von knapp 2000m durchflossen hat [Hocevar et al. 2019].

Der Alpenrhein weist die topografisch - morphologische Charakteristik eines Gebirgsflusses mit Gletschereinfluss auf. Insbesondere in den dichtbesiedelten Talsohlen weicht der aktuelle Zustand wesentlich von typspezifischen Ausformungen des Alpenrheins ab [Keller 1961, zit.n. Frangez & Eberstaller 2020].

3.1.1 Beschreibung der historischen und aktuellen Flussmorphologie

Betrachten wir die morphologische Ausgestaltung historischer Gewässer in des Untersuchungsgebietes, so kann wie eingangs erwähnt bei den Flüssen mit einem EZG größer als 500km² von großteils verzweigten (Rhein, Ill) bzw. verzweigt/gestreckten (Bregenzer Ache) flussmorphologischen Typen gesprochen werden. Der aktuelle Zustand entspricht nicht diesen Typen. Vielmehr sind heute die ehemals verzweigten Abschnitte den anthropomorphen linearen Gerinneausgestaltungen, teils mit hart verbauten Regelprofilen gewichen [Hohensinner et al. 2019]. Nachfolgend wird die historische sowie die aktuelle Morphologie dieser drei größeren Fließgewässer grob umrissen. In diesem Sinne wird bei der Beschreibung der einzelnen Morphologieparameter wie z.B. der Fließgewässertiefe auch aufgrund der historisch schwierigen Datenverfügbarkeit eine generalisierende Annäherung aufgrund des Franziszeischen Katasters und Orthofotos betrieben. Zusätzliche werden über den WMS-Service des Landes Vorarlberg verfügbare, Geodatenlayer herangezogen. Unter anderem sind die Layer "Kontinuumsunterbrechungen", "Restwassser", "Schwall", "Fließgewässer-Anlagen", "Direkteinleitungen" hervorzuheben [VoGIS 1.2021].

3.1.1.1 Bregenzer Ache



Abbildung 3.3: Mündung der Bregenzer Ache – Gegenüberstellung Franziszeischer Kataster 1857 und Orthophoto [Mapire 4.2021]

Historisch

Die Bregenzer Ache entspringt an der Ostflanke der Mohnenflue auf ca. 2400m über dem Meer als Haasenbach. Ihr anfänglicher Verlauf mäandert über den Hochtalboden. Nach der Einmündung des Firneßs[sic]lbach erhöht sich das Gefälle und der Fluss verliert seinen bisher gewundenen Charakter. Die Morphologie wird der engen Talausformung geschuldet gestreckt. Nach weiteren Zuflüssen ist auf 1650m eine leichte Verbreiterung des Fließgewässers auf 10-14m festzustellen. Ebenso weitet sich hier der Talraum auf und ermöglicht wiederum einen gewundenen Verlauf. Nach weiteren sedimentträchtigen Zuflüssen weitet sich die Bregenzer Ache unterhalb der Ortschaft Rehmen auf bis zu 300m breite, verzweigte Passagen. Der Urmappe sind bereits Andeutungen folgender Regulierungsmaßnahmen zu entnehmen, welche die Bregenzer Ache hier in ein 25m breites lineares Gerinne zu verlegen beabsichtigt. In weiterer Folge durchfließt die Ache ein engeres Kerbtal und verläuft teils gestreckt, um alsbald bei Talaufweitungen wieder in einem breiten Flussbett abzufließen. Bei der Mündung des Mellauer Baches hat sich ein Schwemmkegel ausgebildet, welcher die Bregenzer Ache ans gegenüberliegende Ufer in ein ca. 30m breites Bett drängt. Daraufhin fließt die Bregenzer Ache in geringerer Breite weiter und verzweigt sich in gleichwertige (ca. 30m) und schmalere Seitenarme und umschließt teils bewachsene, teils agrarisch genutzte Inseln. In weiterer Folge windet sich der Fluss, diesen Charakter beibehaltend, teils von breiten Waldgürteln gesäumt, bis zur nächsten merklichen Talaufweitung bei Andelsbuch und fließt auf ca. 550m Seehöhe in die Molassezone. Mit einer Breite von 30-70m setzt der Fluss seinen von Wäldern gesäumten, zumeist mit gestrecktem bis pendelndem Lauf Richtung Nordwest fort. Nach der Einmündung des Bolgenacher Baches erhöht sich die Breite des Fließgewässers auf 70-100m und erst beim Austritt aus den

Erhebungen des Bregenzerwaldes erlangt der Fluss wieder einen weit aufgefächerten, verzweigten Charakter. In einem 100 bis 500m breiten Flussbett absolviert die Bregenzer Ache die letzten 40 Höhenmeter bis zur Mündung in den Bodensee.

Aktuell

Der Charakter der Bregenzer Ache ist im Oberlauf noch vergleichbar mit der historischen Ausprägung. Die dem Orthofoto zufolge großteils geschotterte Erschließung der Auenfeldalpe und weiterer Hütten, verläuft teils entlang des Flussbettes, teils überbrückt sie die Bregenzer Ache. Auf ca. 1200m ü. Adria erreicht die Bregenzer Ache das heute ganzjährig bewohnte und über Asphaltstraßen erschlossene Gebiet. Ab sofort teilt sich die Bregenzer Ache das schmal zusammenlaufende Tal mit diesem langgestreckten Bauwerk. Die Bettbreite unterhalb der Ortschaft Schröcken ist streckenweise auf die Hälfte ihrer historischen Breite zusammengestaucht. Die Tal- und Flussbettaufweitung unterhalb Schoppernau / Rehmen, wo sich die Bregenzer Ache historisch zwischen Schotterbänken verzweigte, ist heute durch einen linear gestreckten Charakter geprägt. Die Flussbettbreite beträgt um die 20m. Im historischen Flussbett befinden sich heute Grünland, Gebäude und ein Gehölzstreifen. Bei der Einmündung des Dürrenbaches erfährt die Bregenzer Ache eine kurze Aufweitung auf ca. 50m. Eine bewachsene Kiesinsel wird von zwei Fließgewässerarmen umflossen. Im Anschluss daran wird das Flussbett von bis ans Gewässer reichender Bebauung auf ca. 20m eingeengt. Beim Verlassen dieser Talaufweitung verbreitert sich das Flussbett noch für eine Schlinge um eine gehölzbewachsene Insel, um in eine bereits historisch gestreckte Passage durch ein Kerbtal abzufließen. Diesen Charakter behält das Gewässer auch beim Passieren der Fließstrecke von Schnepfau bei Mellau und verzweigt sich auch nicht mehr in der anschließenden Windung nach Nordost. Bei der Kläranlage in Wilbiger biegt die Bregenzer Ache um 90 Grad nach Südwest und das Flussbett verbreitert sich in diesem Bogen auf 130m. Dort findet zudem eine Ausleitung zur Wasserkraftnutzung statt, wobei die anlaufende Gerinnebreite auf ca. 30m geschätzt werden kann, welche über eine knapp 3m breite Sohlrampe und ein Entlastungsgerinne hinter dem Querbauwerk abfließt. Die restliche Fläche bildet ein 35m breiter mit 5 Sohlstufen versehener - am Luftbild nicht wasserführender - Nebenarm. Vom Fließgewässer getrennt wird er von einer bewachsenen bis zu 70m breiten Insel. Die folgende Strecke bis zum Seitenspeicher Bozenau gilt als Restwasserstrecke. Die Wasserausleitung erfolgt über Freispiegelstollen zum Stauweiher Andelsbuch, um in weiterer Folge über eine Fallhöhe von 62m zum Kraftwerk Alberschwende elektrisch verwertet zu werden [VKW 2.2021a]. Durch den verringerten Abfluss bildet die Bregenzer Ache im nun verhältnismäßig breiten Flussbett einen pendelnden, teils verzweigten Lauf zwischen den Kiesbänken aus. Die Fließgewässerbreite ist dabei jedoch stets geringer als in der historischen Ausprägung und kann, werden die Abflussmengen ohne Stromnutzung herangezogen, als durchwegs gestreckt bis linear bezeichnet werden. Unterhalb des Kraftwerks kommt es zur Schwallbelastung. Die nun von weiteren Zuflüssen geschwängerte und zeitweise auch kräftiger fließende Bregenzer Ache pendelt in einem von Kiesbänken gesäumten Gerinne innerhalb des historischen Flussbettes im folgenden eingekerbten Tal. Vor Kennelbach sorgt ein massives Querbauwerk für die Ausleitung zum Kraftwerk Rieden. Die Wiedereinleitung nach der elektrischen Nutzung erfolgt im Bregenzer Ortsteil Weidach ca. 3,5km flussab. Die ab Kennelbach bis zur Mündung in den Bodensee historisch markante Aufweitung der Bregenzer

Ache mit ihren verzweigten Gerinnen und der von kiesigen und bewachsenen Inseln durchsetzten Flusslandschaft, ist heute merklich anders geartet. Das dicht ans Fließgewässer herangerückte Siedlungsgebiet ermöglicht einen knapp 80m breiten linearen Verlauf und ist von mehreren teils nicht fischpassierbaren Sohlschwellen gekennzeichnet. Unterhalb der letzten Sohlschwelle, über eine Strecke von knapp 1,2km, erfolgt eine anastomose Auffächerung der Bregenzer Ache durch einen ca. 0,5-1km breiten Auwald. Den Daten der Pegelmessstation bei Kennelbach zufolge liegt das aktuelle Mittelwasser bei 46,6m³/s [Vowis 12.2020].

3.1.1.2 Ill



Abbildung 3.4: Ill bei Bludenz – Gegenüberstellung Franziszeischer Kataster 1857 und Orthophoto [Mapire 4.2021]

Historisch

Die Ill entspringt historisch auf 2180m über Adria am Gletschertor des um 1857 zusammenhängend vergletscherten Ochsental-/Vermuntgletschers und verläuft gestreckt durch das Ochsental bis zum Ochsenboden, einer Verflachung vor der Bieler Höhe auf 2000m, um sich dort als 200m breiter verzweigter Sander in mehreren Fließgewässerarmen durch Kiesbänke zu winden. Das Kar verlässt die Ill Richtung Nordwest in einem ca. 30m breiten Flussbett. Diesen gestreckten Charakter behält sie bis zum Austritt aus dem Untervermunttal bei Partenen bei. Ab sofort wechseln sich gestreckte Passagen mit verzweigten Passagen ab. Dem schmalen Talverlauf geschuldete gestreckte Passagen von ca. 20-30m Breite werden von aufgeweiteten, bis zu 75m breiten, von teils bewachsenen Inseln durchsetzten Partien abgewechselt. Die Nutzung der Wasserkraft entlang der Ill ist auch im historischen Kartenmaterial abzulesen. Kleine Bäche zweigen zu Betriebsgebäuden von Mühlen oder Sägewerken ab. Diesem Muster folgend fließt die Ill bis Gaschurn, wo der sedimentträchtige Falschafieler Bach einmündet. Unmittelbar darauf verringert sich auch das Sohlgefälle und die Ill breitet sich über ein 70 bis 170m breites Bett mit ausgedehnten

Kiesbänken und verzweigten Seitenarmen aus. Dem sich verengenden Tal folgend, verschmälert sich auch die Ausformung des Fließgewässers zu einem gestreckt bis pendelnden Verlauf. Soweit es die Talform jedoch zulässt, nimmt sich der Fluss den Raum und umschließt auch bewachsene Inseln. Die Uferpartien sind teils bewaldet, teils agrarisch genutzte Äcker oder Grünland. Bei Schruns variiert das Flussbett in der Breite zwischen 20m und 280m, wobei der Wasserkörper von teils breiten Kiesbänken gesäumt wird. Diese variierende Abfolge setzt sich fort bis St. Anton, wo die schmale Talform nur den Durchfluss eines 25-70m breiten gestreckten Flusses zulässt. Beim Austritt aus dem Montafon und mit Einmündung der Alfenz, dem Alvierbach und der Schesa, verbreitet sich das Fließgewässer merklich und nimmt alsbald einen verzweigten Charakter an. Schmalere gestreckte Strecken wechseln sich mit 500m breiten, verzweigten Passagen ab. Nach Einmündung des Lutz Baches verbreitert sich die Ill zu einem mindestens 100m breiten Fluss, der von weiten Waldstreifen gesäumt Richtung Nordwesten strebt. Der verzweigte Charakter der Ill erfährt bei der Einmündung des Saminen Baches eine leichte Einengung. Der einmündende Bach hat einen Schüttkegel ausgeformt, auf welchem die Ortschaft Frastanz errichtet wurde. Die Ill windet sich um diesen, um sich in eine Senke bzw. Aufweitung zu ergießen. Große Feuchtgebiete südlich der Ill weisen auf eine rückstauende Wirkung der vorausliegenden Engstelle der Ill bei Feldkirch hin. Durch Feldkirch fließt die Ill in einem teils nur mehr 20m breiten Hauptgerinne, während verschiedene Ausleitungen auf vielerlei Nutzungen des Wassers in der Stadt hinweisen. Nach Feldkirch verläuft die Ill in einem ca. 45m breiten, linearen Gerinne Richtung Nordwest in den Rhein. An den Seiten dieses "Kanals" breitet sich ein bis zu 3km breites Auwaldgebiet mit eingesprengter agrarischer Nutzung aus. Aufgrund des Erfassungsschwerpunktes auf steuerbares Land ist zu vermuten, dass hier nur eine zeitsparende schematische Abbildung des Auegebietes erfolgte und demzufolge diese lineare Ausprägung nicht die Realität abbildete. Die morphologische Verengung bei Feldkirch könnte jedoch auch als natürliche "Geschiebesperre" funktioniert haben und bereits damals eine beginnende Eintiefung und Abdämmung der Ill im Auegebiet erleichtert haben.

Aktuell

Die Gletscherzungen des ehemals mächtigen Vermuntgletschers am Piz Buin haben sich heute in den Ochsentaler und Vermuntgletscher gespalten und reichen bis auf knapp 2500m Seehöhe hinunter. Der Gletscherrückgang verlängert die Ill aktuell um ca. 2,5km und 320 Höhenmeter. Anstelle des ehemals 1,7km langen Sanders vor der Bielerhöhe wurde der ca. 2,4km lange und 1,3km² große (Oberfläche bei Stauziel) Silvrettastausee errichtet. Dazu wurde die Grundmoräne des Vermuntgletschers um 25m erhöht und auf der westlichen Seite eine 80m hohe Staumauer errichtet. Der Bau startete im Jahr 1938 und der erste Vollstau wurde 1951 erreicht [Wikipedia: Silvretta Stausee 1.2021]. Unterhalb der Staumauer findet die Ill in ihr ursprüngliches Bett zurück, bis sie nach ca. 3,5km auf 1743m Seehöhe in den Vermunt Stausee mündet, welcher durch eine 50m hohe Staumauer zurückgehalten wird [VKW 2.2021b]. Der nun folgende bereits historisch gestreckte Verlauf durchs Kerbtal bis Partenen ist auch heute morphologisch ähnlich ausgeformt. Geändert hat sich hier die Fließgewässersbreite - sie ist um ca. die Hälfte geringer - und der Abfluss, der Ausleitung zur Stromproduktion geschuldet. Vom Austritt aus dem Silvrettastausee bis Bludenz ist die Ill von einer Restwasserproblematik und in weiterer Folge bis

zur Mündung in den Rhein von einer Schwallproblematik betroffen. Durch eine Ausleitung oberhalb und eine Einleitung unterhalb des Krafthauses in Partenen ist die Ill mit weiteren zwei Staubecken verbunden. Die diversen in dieser Region angelegten Stauseen sind miteinander über Druckleitungen verbunden. Weitere Zuleitungen bringen auch Wasser aus Nordtirol in diese Verwertungskette. In der Kraftwerksgruppe dient der Silvrettaspeicher als Jahresspeicher, während der Vermuntstausee als Wochenspeicher zum Einsatz kommt [ebenda]. Die ab dieser leichten Talaufweitung und mit abnehmendem Gefälle historisch auftretenden Verbreiterungen des Fließgewässers ab Partenen sind heute nicht mehr vorhanden. Die Ill fließt in einem knapp 25 und maximal 30m breiten linearen, teils gestauten Flussbett weiter und ist zusätzlich je nach Stromproduktionsausmaß nur mit einem Bruchteil des natürlichen Abflusses dotiert. Eine kurze Verbreiterung auf knapp 40m erfährt die Ill bei der Einmündung des Gampadelsbaches, um anschließend mit ca. 25-30m Breite in linearer Form weiterzufließen. Bei Kaltenbrunnen wird der Ill weiter Wasser zur Stromnutzung im Rodundwerk entnommen. Im Anschluss erfolgt die Einleitung des in der Kraftwerksgruppe Ill-Lünersee zur Stromproduktion genutzten Wassers in die Ill. Die morphologische Ausgestaltung der Ill verändert sich in weiterer Folge bis zur Mündung in den Rhein nicht wesentlich. Sie passiert bei Nüziders ein weiteres Staubecken und Kraftwerk durch Aus- und Wiedereinleitung und durchläuft vor Feldkirch eine Geschiebesperre. Hinter Feldkirch beläuft sich den Daten der Pegelmeßstation Gissing zufolge der Abfluss bei Mittelwasser auf $65,2\text{m}^3/\text{s}$ [Vowis 12.2020]. Das im Herbst 2014 an der Illmündung in Betrieb genommene Laufkraftwerk Illspitz ist mit Fischmigrationshilfen versehen [Frangez & Eberstaller 2020].

3.1.1.3 Rhein



Abbildung 3.5: Rhein bei Lustenau – Gegenüberstellung Franziszeischer Kataster 1857 und Orthophoto [Mapire 4.2021]

Historisch

Vorausgeschickt sei hier, dass aufgrund des Verlaufes des Untersuchungsgebietes entlang des linken Rheinuferes zur Beschreibung insbesondere auf Zuflüsse orografisch rechts des Rhein eingegangen wird. Der Rhein durchfließt in des Untersuchungsgebietes nur eine Höhendifferenz von ca. 30m und ist somit durch ein recht geringes Gefälle geprägt, verfügt jedoch über eine hohe Sedimentverfügbarkeit und einen beträchtlichen Abfluss. Detaillierte Daten zu Flussbett, Gerinneanzahl und -breite sowie Gewässertiefe des Rheins sind der im Dezember 1825 bei Niederwasser ermittelten Kartierung des Baudirektionsadjunktien Joseph Duile zu entnehmen. So war das Flussbett des Rheins damals von Dammfuß zu Dammfuß zwischen 225 und 760m breit, verlief in 1 bis 3 Gerinnen von 2 bis 118m Breite und wies eine Gewässertiefe zwischen 2,5 und 4,7m auf [Duile zit. nach Kaiser 2.2021].

Der Vorderrhein verläuft entlang einer sich parallel zum Alpenbogen ziehenden Längstalfurche (Rhone-Rhein-Furche) und biegt bei Chur nach Norden ab um den alpinen Deckenstapel zu durchbrechen und sich in den Bodensee zu entleeren. Unmittelbar nach seinem Eintritt in das Untersuchungsgebiet münden die wesentlichsten vorarlbergischen Zuflüsse, die Ill sowie der Frutzer Bach, in den Rhein. Die Breite des Fließgewässers beträgt zwischen 200 und 500m. Der flussmorphologische Charakter kann hier durchwegs als verzweigt bis gewunden bestimmt werden. Sich aufteilende Gerinne winden sich durch Kiesinseln im breiten Flussbett. In weiterer Folge windet sich der Rhein in einem weiten Bogen um die Diepoldsau und gräbt sich am Prallufer in das umliegende Land ein, während am Gleitufer mitunter breite Kiesbänke abgelagert werden. Der Rhein passiert die Ortschaft Lustenau und dreht in einem spitzen Winkel vor Höchst nach Westen ab. Das Prallufer reicht an die Ortschaft Brugg heran, während es ein knapp 150m breiter Auwaldstreifen von Höchst trennt. Er folgt nun einer, ein Mäander

andeutende, Doppelschleife, um schließlich in nordwestliche Richtung in den Bodensee zu streben. Von der Doppelschleife ausgehend, den Gehölzsaum durchbrechend, verläuft eine nach Norwest ausgerichtete ca. 130m breite Grünlandschneise (auf der Urmappe als „Rhein Rinnsal“ bezeichnet), welche im Hochwasserfall einen direkteren Abfluss in den Bodensee ermöglichte. Die Mündung erfolgte entlang des „Rheinholzes“ – einer ca. 2km langen vom Auwald gesäumten Fließstrecke. Im Franziszeischen Kataster ist vermutlich aufgrund der Randlage im Kartierungsgebiet und der Dynamik des Lebensraumes keine Deltabildung angedeutet. Es kann für den historisch nicht großartig in seinem Geschiebehalt beeinträchtigten Alpenrhein durchaus angenommen werden, dass sich hier ein Flusstyp mit anabranching und mit Annäherung an die Bodenseemündung auch anastomosen Charakterzügen ausbilden konnte.

Den Strom flankieren auf dem gesamten in des Untersuchungsgebietes liegenden Abschnitt breite Kiesbänke, Auwälder und Feuchtgebiete. Diese zeigen an, dass der Rhein auf seiner absolvierten Fließstrecke durch die Schweiz und Lichtenstein große Mengen an eingetragenen und aufgesammelten, mechanisch zerkleinerten und gelösten, groben und feinen Sedimenten mit sich führte und nach Belieben ablagerte und weitertransportierte.

Aktuell

Am vorarlbergischen Rheinabschnitt sind im ausgehenden 19. Jahrhundert zwei wesentliche Korrekturen vorgenommen worden [Krapf 1937]. Zum Einen der "Diepoldsauer Durchstich", welcher die ehemalige Schleife um die Diepoldsau über schweizerisches Gebiet auf ca. 5km verkürzt und zum Anderen erfolgte nördlich von Lustenau der "Fußacher Durchstich", welcher den vormals südlich um Höchst nach Westen in den Bodensee mündenden Rhein nunmehr östlich Höchst geradewegs in den Bodensee führt. Das kanalartig geformte Flussbett des Mittelgerinnes wird von Dämmen gesäumt. Ab Bangs rechtsufrig und ab Oberriet auch linksufrig wird dieses Gerinne von ca. 100m breiten Vorländern begleitet, welche wiederum von Hochwasserdämmen eingeschränkt werden. Die im ehemaligen Verlauf verbliebenen Altarme wurden vom Hauptgerinne weitgehend abgedämmt. Unter anderem durch diese Maßnahmen beträgt der jährliche Feststoffeintrag durch den Rhein in den Bodensee bis zu 3 Mio. m³, größtenteils in Form von Schlamm und Feinsand. Im Mündungsbereich kommt es aufgrund der abnehmenden Schleppkraft und den naturgemäß im Mündungsbereich anastomosen Tendenzen des Fließgewässers zu einer verstärkten Ablagerung der Geschiebefracht. Aus diesem Grund werden dort jährlich zwischen 50.000 und 100.000m³ an Sedimenten ausgebaggert und in die Bauindustrie abgeführt [IRKA & IRR 1.2021]. Um weitere Verschlammung des Regelprofils mit dem mitgeführten Überhang an Feinsedimenten zu unterdrücken, wird der Mündungsbereich laufend in den Bodensee vorgestreckt und beläuft sich aktuell auf 3,55km von Flusskilometer 91-94,55. Bei Niederwasser führt der Rhein ca. 40m³/s, bei Mittelwasser ca. 230-250m³/s, die mittlere Fließgeschwindigkeit beträgt ca. 1-5m/s und das Gefälle variiert zwischen 1 und 2% [IRR 1.2021]. Die Gewässertiefe ist stark durch die im Alpenrhein vorherrschende künstlichen Abflussschwallbelastungen geprägt [Frangez & Eberstaller 2020]. So reicht beispielsweise die

Wasserstandsganglinie bei Niedrigwasser im Dezember 2020 an der Höchster Brücke bei Lustenau nur knapp unterhalb von 500cm [Vowis 12.2020].

Das Vorstreckungsprojekt begannen 1972, nachdem sich am Austritt des Fußacher Durchstichs rasch ein Schwemmkegel bildete und eine Zweiteilung des Sees drohte.

"Wenn der Mensch nach 1900 nicht eingegriffen hätte, würde Hard heute nicht am Bodensee liegen, sondern am Rande einer grossen Schwemmebene. Der Alpenrhein schiebt jährlich rund zwei Millionen Kubikmeter Sand und 40.000 Kubikmeter Kies von den Alpen in Richtung Bodensee. [...] Ohne künstliche Eingriffe wäre das größte Süßwasserdelta Europas ein sehr dynamischer Lebensraum mit Auwäldern, Röhricht und sich ständig verändernden Sand- und Kiesinseln." [Plattform lebendiger Rhein 2.2021]

Das Ungleichgewicht im Sedimenthaushalt deutet auf eine fehlende Vernetzung mit den Zuflüssen aufgrund zahlreicher vorgelagerter Geschiebesperren und Staustrecken hin. Diese selektive Entfernung grober Sedimente verursacht wie an vielen stark verbauten Fließgewässern auch entlang des Alpenrheins stellenweise massive Eintiefungen des Flussbettes [Dietsche & Zarn 2018].

Die aktuelle morphologische Situation wird im Rahmen eines fischökologischen Monitorings im Auftrag der IRKA treffend umrissen:

"Die 'Internationale Strecke' bis zum Bodensee ist als Doppeltrapezprofil mit ca. 100 m breiten Vorländern ausgebildet. Der Rhein verläuft hier in einem monotonen, geradlinigen Bett mit durchgehend blockwurfgesicherten Ufern. Kiesbänke fehlen aufgrund der geringeren Breite des Mittelwasserbettes gänzlich." [Frangez & Eberstaller 2020, S. 9]

Der tiefstgelegene Fließgewässerabschnitt im EZG, bzw. der Alpenrheinabschnitt ab der Illmündung, sowie ein kurzer Abschnitt der Bregenzer Ache kann als Epipotamal (Barbenregion) eingestuft werden. Dies entspricht einem Fluss mit niedrigem Gefälle aber hoher Fließgeschwindigkeit. Die fischökologischen Leitarten des vorarlbergischen Alpenrheins, sowie des größten Rheinzubringers im EZG, der Ill, sind Äsche, Bachforelle und Groppe. In der Ill kommt noch die Bachschmerle zu den Leitarten hinzu. Dies sind rheophile Arten, die kaltes und sauerstoffreiches Wasser benötigen. Alle diese Arten sind Kieslaicher und halten sich bevorzugt in strömungsberuhigten und sichtgeschützten Unterständen auf [Frangez & Eberstaller 2020]. Alle weiteren Fließgewässer des Untersuchungsgebietes sind dem limnologischen Rithral und somit den Äschen- oder Forellenregionen zuzuordnen [NGP 2015].

3.2 Wirtschafts- und Siedlungsraum

Der Alpenraum in seiner heutigen Ausprägung ist ohne die Jahrtausende andauernde Prägung durch den Menschen nicht denkbar. Zwar galt der Alpenraum aufgrund „schwieriger und schwankender Umweltbedingungen als suboptimaler Siedlungs- und Wirtschaftsraum“ [Haidvogel & Tasser 2019, S. 227], aber es sind bereits um 4500 v.Chr. neben der Wandertierhaltung auch Zeugnisse von Ackerbau nachweisbar. Nach einem Bevölkerungsanstieg um ca. 1000 n.Chr. kam es zu einer Welle von Rodungen, Siedlungs- und

Klostergründungen. Der Bergbau ließ einzelne Orte in kürzester Zeit zu Städten anwachsen. Mit dem Fortschritt in der Nutzung der Naturressourcen z.B. im Bergbau ging auch die Intensivierung der Landwirtschaft einher. Erst mit Ende des 19. Jahrhunderts konnte die stets unrentabler werdende Ausbeute der Bergwerke und die an Grenzen stoßende Ertragssteigerung in der Landwirtschaft nicht mehr mit dem Bevölkerungswachstum mithalten und eine tiefgehende Landflucht erfasste insbesondere höhergelegene kargere Seitentäler. Mit dem Aufkeimen des Tourismus und dem Wirtschaftsboom der Nachkriegszeit wurde eine neue Ära des Wohlstandes für die Bevölkerung des Alpenraumes und somit eine Trendumkehr eingeleitet [ebenda].

Vorarlberg ist eine Erfolgsgeschichte der naturräumlichen Aneignung durch den Menschen. Von jeher begünstigt durch den Strukturreichtum, die Rohstoffverfügbarkeit, die geografische Gunstlage, abseits der verwaltungspolitisch übergeordneten Hauptstadt Wien, jedoch im Herzen Europas gelegen, ließen die Gemeinden im Rheintal durch den regen Wissens- und Warenaustausch über die Staatsgrenzen hinaus stark florieren. Die Kraft des Wassers und die Nutzbarmachung der Energie war hierbei ein wichtiger Motor und Ermöglicher. Abseits der Direktnutzung der Fließgewässer und Seen als Nahrungsmittellieferant, ermöglichten zahllose Mühlen und Kleinkraftwerke lokal so Einiges, vom Mahlen des Getreides bis zum Zuschnitt des Holzes. Bahnbrechende Erfindungen erleichterten auch hier nach und nach das anfangs ärmliche und karge Leben der Bevölkerung. Den Betrieb dieser neuartigen mechanischen und elektrischen Apparaturen ermöglichte die unentwegt verfügbare Ressource Wasser [Bleyle 11.2002]. Die goldenen Zeiten des Kraftwerksbaus waren in Vorarlberg zwischen 1940 und 1980, mit der Fertigstellung und Inbetriebnahme der größten Stauseen und angeschlossenen Kraftwerke - des Rodundwerks I & II, dem Kopswerk, Lünenseewerk und Langenegg [Plitzner 11.2002].

Die Einwohnerzahl Vorarlbergs betrug im April 2020 um 398.500 [Statistik Austria 4.2021] und ergibt somit eine Populationsdichte von ca. 150 Personen pro Quadratkilometer. In den Gunstlagen des Rheintals werden die Gemeindegrenzen durch eine zusammenwachsende Infrastruktur mehr und mehr aufgelöst und der Siedlungsraum im Rheintal zählt heute zu den am dichtest besiedelten ländlichen Räumen Österreichs. Nun, da wir das Untersuchungsgebiet gut überblicken, geht es im Folgenden um die erhobenen Daten und deren Analyse.

4 Grundlagendaten

4.1 Historische Landbedeckung

Der Datensatz zur historischen Landbedeckung „LB 1857“ basiert auf bereits georeferenzierten Katasterblättern aus dem Katastralmappenarchiv des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen (BEV). Der auch als „Urmappe“ bezeichnete „Franzische Kataster“ ist auf den Auftraggeber dieses kolossalen Kartierungsprojektes zurückzuführen. Die Arbeiten am Kataster, nach dem Vorbild des von Johann Jakob Marinoni geschaffenen Mailänder Katasters, wurde im Auftrag Kaiser Franz I. durch den Erlass des Kaiserlichen Grundsteuerpatentes zur Schaffung eines allgemeinen, gleichförmigen und stabilen Steuersystems aufgenommen. Über einen Zeitraum von 44 Jahren (1817-1861) für das gesamte österreichische Bundesgebiet (670.000km²) erstellt und ist in seiner Gesamtheit insbesondere im besiedelten Raum von unvergleichlichem historischen Wert [Fuhrmann 2007]. Die Vermessungen in den Gebieten des Untersuchungsgebietes wurden um 1857 fertiggestellt (demnach wird in weiterer Folge auf den historischen Zustand 1857 bzw. die Landbedeckung 1857 Bezug genommen).

Im Jahr 1871 wurde der Kataster mit dem Grundbuch im Allgemeinen Grundbuchsgesetz zusammengeführt und bildete fortan ein wichtiges Instrument der Rechtspflege. Wurde 1869 eine periodische Revision des Katasters alle 15 Jahre vorgesehen, blieb es aus finanziellen Gründen bei einer einmaligen Durchführung. In weiterer Folge wurden nur dauernde Kulturänderungen und Irrtümer überarbeitet. Bis zur Ablöse durch den Grenzkataster 1968 wurde der Kataster zur Evidenz für das Grundbuch verwendet.

Liegt der Abbildungsmaßstab des Franzischen Katasters meist bei 1:2880 (1 Zoll in der Mappe entspricht 40 Klafter in Natur sowie 1 Quadratzoll entspricht 1 n.ö. Joch bzw. 1600 Quadratklafter), so wurde im Stadtgebiet fallweise erheblich detaillierter mit (1:1440) und im Hochgebirge nur ein halb so großer Maßstab verwendet (1:5760). In den Randzonen der damals belebten und bewirtschafteten Gebiete entfiel diese Genauigkeit somit in weitaus geringerer Detailtreue [Fuhrmann 2007] [Abart 2020]. Daher wurde insbesondere für die Digitalisierung der Gletscher die zur Landesverteidigung erstellten und damit im Grenzbereich genaueren Daten der mit 1816-1821 etwas früher erstellten Zweiten Landesaufnahme bzw. Franzischen Landesaufnahme [ÖStA/KA - 2. Landesaufnahme] zu Hilfe genommen.

4.2 Aktuelle Landbedeckung

Der aktuelle Datensatz sticht durch seine Heterogenität hervor. Zur Erstellung desselben wurden Daten des LISA-Level-II Datensatzes von 2016 [GeoVille 2016], INVEKOS Kulturdaten [BAB 2019], [BMLRT 2019] und Daten des Projects SPARE [SPARE 2018] zusammengefügt und mit der auf Google Earth Bildern von 2015 basierenden Gletscherkartierung [Buckel et al. 2018] gesondert ergänzt.

Bei den sogenannten LISA Daten handelt es sich um die im Land Information System Austria zusammengeführte Klassifizierung von Fernerkundungsrohdaten. Es ist dies eine nationale Anstrengung zur Verfügbarmachung von flächendeckenden Geoinformationen zur Feststellung des Zustandes und der Entwicklung der Landbedeckung für verschiedenste Fachbereiche der öffentlichen Verwaltung wie Raumplanung, Forst-, Land- oder Wasserwirtschaft sowie der Privatwirtschaft. Aufgrund der Tatsache, dass es sich hier um eine österreichweit einheitliche Satellitenbildinterpretation mit einer Pixelgröße von 10x10m handelt, sind beim visuellen Abgleich mit stets hochauflösenderen Orthofotos gewisse Unschärfen in der doch sehr fein strukturierten Landbedeckung des ländlichen Raumes erkennbar.

Die Tatsache, dass dieser Datensatz nur begrenzt zwischen Grünland, ungeerntetem Ackerland und Wäldern unterscheidet, macht die Integration weiterer Daten notwendig. Diese Geodaten wurden bezüglich einzelner Kategorien mit detaillierteren vorliegenden Fachbereichskartierungen und Landnutzungsdaten erweitert. Die aus Förderprogrammen bekannte parzellenscharfe Landnutzung im agrarischen Bereich (INVEKOS Kulturdaten) konnte insbesondere für die Klassen Ackerland & Grünland präzisere Geodaten bereitstellen.

In ähnlichem Maße wurden Daten aus wissenschaftlichen Forschungsprojekten bezüglich der Gewässer in die Erstellung des aktuellen Landbedeckungsdatsatzes integriert. Aufgrund der Ausdehnung des Untersuchungsgebietes über die heutigen Bundeslands- und Staatsgrenzen hinaus und der damit einhergehenden limitierten durchgängigen Grundlagendatenverfügbarkeit aller dieser Quellen, wurde anschließend der Datensatz durch Digitalisierung anhand von Orthofotos vervollständigt [geoland Orthophoto 6.2020].

Bezüglich der stehenden Gewässer in Form von Teichen und Tümpeln erfolgt nur eine sehr unvollständige Abbildung durch die LISA-Daten. Deshalb erfolgt auch hier ein manueller Abgleich durch DI Dr. Severin Hohensinner anhand von GIS-Daten aus der OpenStreetMap [geoland 2020].

Kleinere Fließgewässer (mit EZG>10km²) wurden aus dem GIS-Datensatz des Alpine Space Projektes „SPARE“ übernommen [SPARE 2018]. Diese lagen als Polylinien vor und wurden nach Flussordnungszahl und Einzugsgebietsgröße klassifiziert. Nach Definition einer bestimmten repräsentativen Pufferbreite wurden diese Linien in Polygone überführt und in den aktuellen Landbedeckungsdatsatz eingefügt. Es erfolgte des Weiteren eine Aufnahme zahlreicher kleinerer, mindestens 5m breiter Fließgewässer, damit eine Vergleichbarkeit zum historischen Datensatz gegeben ist.

Beim aktuellen Datensatz handelt es sich also größtenteils um eine, durch Klassifikation von satellitengestütztem Bildmaterial ermittelte Abbildung aktueller Landbedeckung sowie integrierter agrarischer Landnutzungsdaten. Zur Terminologie Landbedeckung und Landnutzung kann der Definition des Projekts LUCAS zufolge angemerkt werden, dass Landbedeckung bzw. landcover in der Fernerkundung mit biophysikalischen Rohdaten gleichgesetzt wird. Landnutzungsdaten bilden den sozioökonomischen Nutzen ab, der aus der betreffenden Fläche gezogen wird [LUCAS 2019]. Dem überwiegenden Anteil der Daten entsprechend wird in weiterer Folge von Landbedeckungs- und weniger von Landnutzungsdaten gesprochen.

Dem Bedürfnis einer europaweit harmonisierten Datengrundlage zum Umweltmonitoring für flächenstatistische Betrachtungen und Einhaltung von Berichtspflichten geht stets die Diskussion um die Neutralität und Objektivität derselben einher. So birgt jede Klassifikation zur Kartenerstellung eine gewisse Generalisierung und damit eine geometrische Vereinfachung und inhaltliche Zusammenlegung in sich und führt damit zwangsweise zum Informationsverlust. Aus diesem Grund ist eine Kombination verschiedener Geoinformationen, verschiedener Maßstäbe oder verschiedener Begriffsdefinitionen aus Mangel an Alternativen durchaus ein geeignetes Mittel um komplexe Fragestellungen zu bearbeiten. Die Vereinheitlichung und Harmonisierung dieser Geoinformationen zu einer überregionalen und multinationalen Vergleichbarkeit auf einer europäischen Ebene stellt eine aktuelle Herausforderung in der Fernerkundung dar [Arnold et al. 2017].

4.3 Überflutungsgebiete bei HQ300

Die Darstellung der Hochwassergefährdungszonen für diese Arbeit umfasst Überflutungsgebiete bei ca. HQ300 für alle Fließgewässer mit einem Einzugsgebiet größer als 10km², ebenso für kleinere Fließgewässer mit einer historischen Mindestbreite von fünf Metern sowie einer großen Zahl von kleineren Zonen und Talhängen, welche von der Wildbach- und Lawinenverbauung (WLV) als überflutungsgefährdet oder von Murenabgängen betroffen, eingestuft worden sind.

4.3.1 Aktuelle Überflutungsgebiete

Die Grundlage für das HQ300-aktuell bildet der standardisierte GIS-Gefahrenzonen-Datensatz für Extremereignisse bei ca. HQ300 [BMLRT 2020]. Dieser beinhaltet jedoch nur HQ-Daten, für welche es ein Projekt zur Modellierung der Überflutungsflächen gegeben hat. Sämtliche Ergänzungen desselben wurden durch HQ200-Daten aus der HORA-Abflussuntersuchung vorgenommen [HORA 2014]. Die vorhandenen artifiziellen Lücken zwischen den verschiedenen Datensätzen wurden alsdann mittels DGM und Orthofoto manuell von DI Dr. Severin Hohensinner im GIS bereinigt. Für viele der ermittelten kleineren Zubringer in schmalen Tälern und Schluchten lagen trotz der beiden umfassenden Grundlagen keine Daten zu Hochwasserrisikozonen vor. Diese wurden in ähnlicher Weise von Severin Hohensinner ergänzt, zumal der potentiell überflutete Talraum in derart kleinen Tälern gut erkennbar ist.

4.3.2 Historische Überflutungsgebiete

Aufgrund der Tatsache, dass für den historischen Zustand keine das gesamte Untersuchungsgebiet abdeckenden Daten zur Hochwassergefährdung verfügbar sind, wurde ein manueller Angleich der aktuellen Daten an historische Begebenheiten mittels Franziszeischem Kataster, Orthofotos und aktuellem Geländemodell (DGM mit 10m Rasterweite von 2018) ausgeführt. Unter Berücksichtigung von auf regelmäßige Überschwemmung hinweisende gewässerbegleitende historische Landbedeckungen im Kataster (z.B. Weide) sowie erfolgten gewässernahen Bautätigkeiten, Dämmen und Aufschüttungen in der Zeit zwischen 1857 und 2016 wurde der aktuelle HQ300-Datensatz in die historischen Überflutungsgebiete überführt.

4.4 Digitales Höhenmodell

Um Aussagen in der dritten Dimension zu tätigen, wurde ein DGM (Digitales Gelände Modell) vom Jahr 2018 mit einer Auflösung von 10x10m herangezogen [Geoland DGM 2020]. Die mittels Geländemodell eruierten Daten sind unter dem Umstand zu betrachten, dass es im Grenzbereich der studysite teils nur mangelhafte Überdeckung gibt und somit einige Hektar nicht mit Werten aus dem DGM analysiert werden können (weiteres dazu in Kap. 6.2 & 7.1).

5 Methodik

Die Ermittlung der Daten erfolgte über Vektorisierung von historischen Rasterdaten und die Aggregation von aktuellen Landbedeckungs- und Landnutzungsdaten im GIS. Mittels deskriptiver Statistik werden Aussagen aus den ermittelten Daten getroffen. Ergänzende Literaturrecherchen ermöglichen eine weiterführende Interpretation der GIS-basierten Ergebnisse.

Folgende Geodatenlayer werden zur Untersuchung erstellt bzw. herangezogen:

- Untersuchungsgebiet
- historische Landbedeckung
- aktuelle Landbedeckung
- historische Überflutungsgebiete bei HQ300
- aktuelle Überflutungsgebiete bei HQ300
- Digitales Gelände Modell DGM

5.1 Historische Landbedeckung

Die der Erstellung des Katasters zugrundeliegenden Instruktionen weisen über 40 Benützungsklassen in 6 Hauptkulturen aus. Für den Zweck dieser Arbeit wurden diese in 11 Landbedeckungsklassen zusammengefasst, welche in weiterer Folge im GIS vektorisiert wurden (Abb. 5.1).

Die Klasse der Fließgewässer umfasst dabei das aktive Gerinne (active channel), welches sich aus Wasserfläche und angrenzenden unbewachsenen, in des Untersuchungsgebietes zumeist aus Schotter bestehenden, Sedimentbänken zusammensetzen. Ebenso zur Klasse der Fließgewässer werden Ödlandflächen aggregiert, welche fluviale Überformung aufweisen, d.h. Schotterflächen im unmittelbaren Einflussbereich des aktiven Gerinnes.



Abbildung 5.1: Klassen der historischen Landbedeckung

Die Klasse (Obst)Baumwiesen umfasst im historischen Landbedeckungslayer locker bewaldetes Gebiet und somit sowohl Streuobstwiesen, Weiden mit vereinzelt Gehölzen oder Gehölzgruppen als auch die Krummholzzone in hochalpinen Lagen (Weiteres dazu in Kap. 7.1 und 6.2).

Die Klasse Ödland wird großteils durch Felsen und unbewachsene Schuttflächen in Hanglagen zusammengesetzt. Aufgrund der im Franziszeischen Kataster mit geringerem Maßstab

kartierten Berggipfel und damit einer größeren Ungenauigkeit in ebendort gehäuft vorkommenden Felsen und Schutthalden sowie Gletschern, musste der digitalisierte Kataster einem weiteren Bearbeitungsschritt unterzogen werden, um einen annähernd ähnlichen Detaillierungsgrad über das gesamte Untersuchungsgebiet zu erhalten.

Dazu wurden im GIS die Flächen des wesentlich genaueren Ödlands 2016 in den historischen Landbedeckungslayer importiert und mit den zuvor bereits vektorisierten historischen Ödlandflächen verschmolzen. Dies unter der Annahme, dass alle Flächen, die heute Ödland sind, auch schon unter den kälteren Klimabedingungen der ausgehenden Kleinen Eiszeit Mitte des 19. Jahrhunderts Ödland waren. Dabei wird angenommen, dass solche Flächen damals auch in größere Höhenlagen als aktuell reichten. Durch diesen Datenimport wurden im Gebirge kleinere Flächen an Grünland, Wälder oder Baumwiesen überschrieben, während alle anderen historischen Landbedeckungsklassen beibehalten wurden. Ebenso wurden die zur Erstellung des aktuellen Landbedeckungslayers herangezogene Ausdehnung der *Gletscher* in den historischen Datensatz importiert. Diese Gletscherflächen wurden auf Basis der Gletscherausdehnung in der Franziszeischen Landesaufnahme 1816-1821 erweitert.

Abstraktion

Die Digitalisierung des Katasters in ein Polygon-Shapefile erfolgte durch folgende vier Abstraktionen von kleinteiligen und linearen Kartenelementen (Abb. 5.2):

- * 15m - Mindestbreite von linearen Landschaftselementen (schmale Parzellen)
- * 5m - Mindestbreite von Fließgewässer und Kanälen
- * Straßen und Wege innerhalb vom Siedlungsgebiet
- * Siedlungsgebiete im Verband



Abbildung 5.2: Abstraktionen von kleinteiligen und linearen Kartenelementen

Die drastischste Maßnahme hierbei ist die Festlegung der Mindestbreiten von linearen Elementen. Mit in die Digitalisierung als eigenes Polygon aufgenommen wurden nur Elemente, die im Schnitt über 15m breit sind. So wurden zum Beispiel gewässerbegleitende Grünlandelemente großteils der nächstgelegenen großflächigen Nutzungsklasse zugeordnet. Erfolgte diese Abstraktion zwischen Polygonen, die weder ein stehendes Gewässer noch einen Fluss beinhalten, erfolgte die Aufteilung in benachbarte Klassen. Es entfielen jedoch keine dieser aufgeteilten Flächen auf stehende oder fließende Gewässer, um nicht eine Verfremdung des mithilfe dieser Daten in weiterer Folge modellierten Abflussverhaltens zu produzieren. Die im Kataster vermerkten Fließgewässer und Kanäle wurden ab einer Mindestbreite von 5m erfasst. Dies ist auch der im alpinen Raum recht vagen Kartierung derselben im Quellenmaterial geschuldet, die teilweise nur schematischen Darstellungscharakter aufweisen. Straßen und Wege wurden nur im Verband mit bebautem Gebiet in der Klasse Siedlungsgebiet mit aufgenommen. Auf offener Flur entfielen die Verkehrsflächen somit, der oben genannten Mindestbreitenregel folgend, auf umliegende Landbedeckungsklassen. Ähnlich erfolgte auch die Abstrahierung von Siedlungsgebieten, welche nur im Verband digitalisiert wurden und bei sehr verstreut auftretenden kleinen Gehöften den umliegenden Landbedeckungsklassen zugeordnet wurden. So wurden den historischen Siedlungsflächen auch kleinere angrenzende oder dazwischenliegende Gärten, Parks oder Grünflächen zugeschlagen.

5.2 Aktuelle Landbedeckungsklassen

Zur Vergleichbarkeit mit dem historischen Datensatz, wurden die verfügbaren Daten in dem historischen Datensatz ähnliche Klassen zusammengefasst. Einen leichten Unterschied zum historischen Datensatz bringt die Klasse *Obstanlagen* mit sich, welche nur im Rahmen von Fördermaßnahmen dokumentierten intensiven Obstbau listet, wogegen die historische Klasse der *(Obst)Baumwiesen* auch locker bestandene und oft auch beweidete Wiesen oder die Krummholzzone (Latschen/Grünerlen) in großen Höhenlagen bezeichnet. Weiteres dazu in der Diskussion unter Kap. 7.1. Ebenso gibt es Unterschiede in der Erfassungsgenauigkeit der Klasse *Siedlungsgebiete*. In der aktuellen Landbedeckung fehlen kleine Gehöfte völlig und in größeren Siedlungsverbänden wurden zum Teil Gärten und andere unbebaute Flächen ausgenommen. Daraus folgt, dass aktuelle *Siedlungsgebiete* im Vergleich zu den historischen tendenziell zu geringe Flächen aufweisen. Aufgrund des aggregierten Charakters des Datensatzes sind hier verschiedene Operationen zur Integration einzelner Klassen erfolgt. Eine nähere Erläuterung ist im Kap. 4.2 zu finden - hier folgt eine kurze Übersicht (Tab. 1):

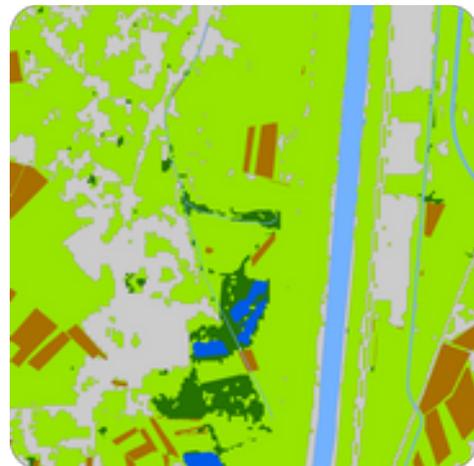


Abbildung 5.3: Zusammensetzung der aktuellen Landbedeckung aus Raster- und Vektordaten

LC 2016	Quelle(n)	Anmerkung
Siedlungsgebiete	LISA: 11 – Build-up, 12 – Flat sealed surfaces	
Fließgewässer	LISA: 60 – Water SPARE – FG mit EZG > 10km ²	Nachträgliche Bearbeitung mittels OpenStreetMap und Gewässernetz des Alpine Space Projekts „SPARE“ durch Severin Hohensinner
Stehende Gewässer	LISA: 60 – Water	Nachträgliche Bearbeitung mittels OpenStreetMap und Gewässernetz aus dem Alpine Space Projekt SPARE durch Severin Hohensinner
Feuchtgebiete	LISA: 130 – Reeds	
Grünland	LISA: 122 – Herbaceous periodically LISA: 125 – Herbaceous permanent low prod. LISA: 126 – Herbaceous permanent high prod.	tlw. auch Äcker – Nachträgliche Korrektur mit INVEKOS-Daten durch Severin Hohensinner
Äcker	LISA: 31 – Permanent soil	tlw. auch Almen und Ödland – Nachträgliche Korrektur mit INVEKOS-Daten durch Severin Hohensinner
Weingärten	INVEKOS - Weingärten	
Obstanlagen	INVEKOS - Obstanlagen	
Wälder	LISA: 91 – Broad-leaved trees LISA: 93 – Coniferous trees LISA: 100 – Bushes and shrubs	
Ödland	LISA: 32 – Bare rock and screes	
Gletscher	LISA: 70 – Snow and Ice	Nachträgliche Ergänzung mit Daten von Buckel et al. 2018 durch Severin Hohensinner

Tabelle 1: Übersicht Datenquellen aktuelle Landbedeckung und Nachbearbeitung einzelner Klassen

5.3 Hochwassergefährdungszonen

In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts wurde in akademischen Kreisen auch für das Rheintal eine annähernde Gesamtansicht von teilweise dokumentierten historisch verortbaren Auswirkungen von Überflutungen [Beger & Binder 1872] und den damit einhergehenden Verwüstungen durch Uferbrüche, Versandungen und Versumpfungen [Baumgartner 1864] erstellt, welche den Anlass für daraufhin vorangetriebene sogenannte

Korrektionsmaßnahmen [Kaiser 7.2020] am vorarlbergisch-schweizerischen Rheinverlauf bildeten. Es ist jedoch, aufgrund des Klimawandels und der geänderten Landnutzung, schwierig eine konkrete Jährlichkeit für historische HQ-Zonen anzugeben [Drexel 2009], [Blöschl et al. 2019a]. Der erstellte Datensatz *HQ300-historisch* erstreckt sich somit über jene Bereiche, die einstmals vermutlich bei gleicher Spiegellage wie beim aktuellen Überflutzungszoneilayer (*HQ300-aktuell*) hochwassergefährdet waren. Zusätzlich wurden auch solche Bereiche als historische Überflutzungszoneil ausgewiesen, wo der Hochwasserspiegel aufgrund regulierungsbedingter Sohleintiefung aktuell zwar wesentlich tiefer liegt als früher, die einstige Ausdehnung des potentiell hochwassergefährdeten Gebietes aber anhand des Franziszeischen Katasters und der Geländestrukturen in den Orthofotos zweifelsfrei erkennbar sind. Dabei ist es mit der gewählten Methodik nicht möglich genau zu bestimmen, ob die historisch ermittelten Überflutzungszoneil bei HQ300, HQ400 oder nur bei HQ200 überflutet wurden.

5.3.1 Fließgewässerfehler

Aufgrund der Ungenauigkeit des Katasters (vgl. Kap. 4.1 & 7.1) und des Abstraktionsgrades der Digitalisierung der Fließgewässer im historischen Landbedeckungslayer, liegen einige Fließgewässer außerhalb des Überflutzungsraumes (Abb. 5.4). Es handelt sich hierbei um 2km² Fließgewässer, welche bei der historischen Kartierung im strukturreichen Gelände Vorarlbergs relativ ungenau verortet worden sind bzw. wo aufgrund der heutigen Geländemorphologie

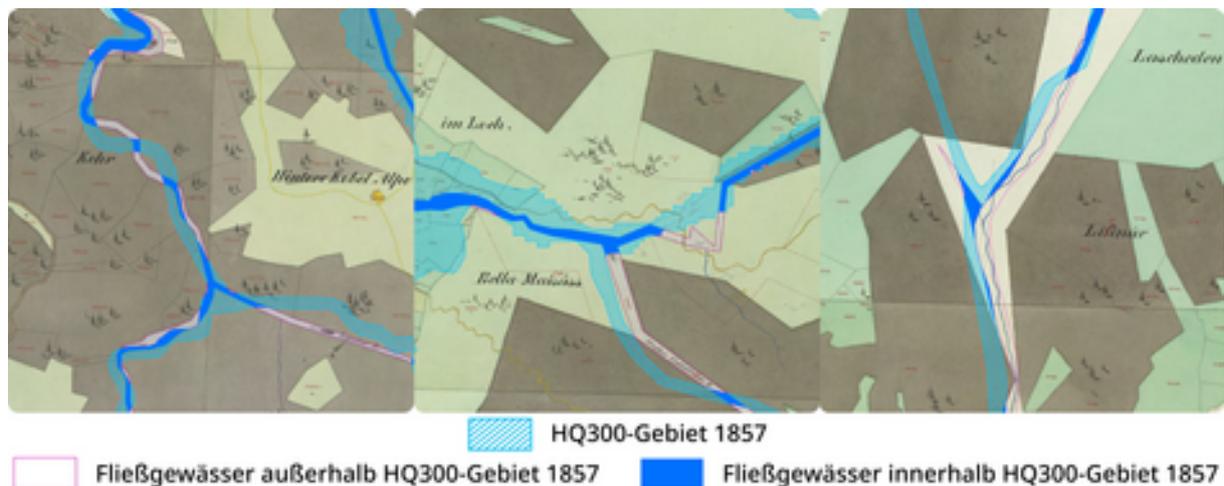


Abbildung 5.4: Die sogenannten ‚Fließgewässerfehler‘ sind mit geringerer Genauigkeit der Kartierung im strukturreichen Gelände der Berggebiete zu erklären und somit insbesondere an den Oberläufen zu verorten

sowie historischer Aufzeichnungen von schlichten Kartierungsfehlern ausgegangen werden kann. Um Flächenfehler in den Ergebnissen bezüglich der Landbedeckung in den Überflutzungsgebieten auszugleichen, wurde nach verschiedenen Herangehensweisen gesucht, die Landbedeckung in unmittelbarer Nähe dieser außerhalb der HQ-Flächen angesiedelten Fließgewässer zu ermitteln. Folgende zwei Methoden wurden herangezogen, um diesen Fehler zu minimieren:

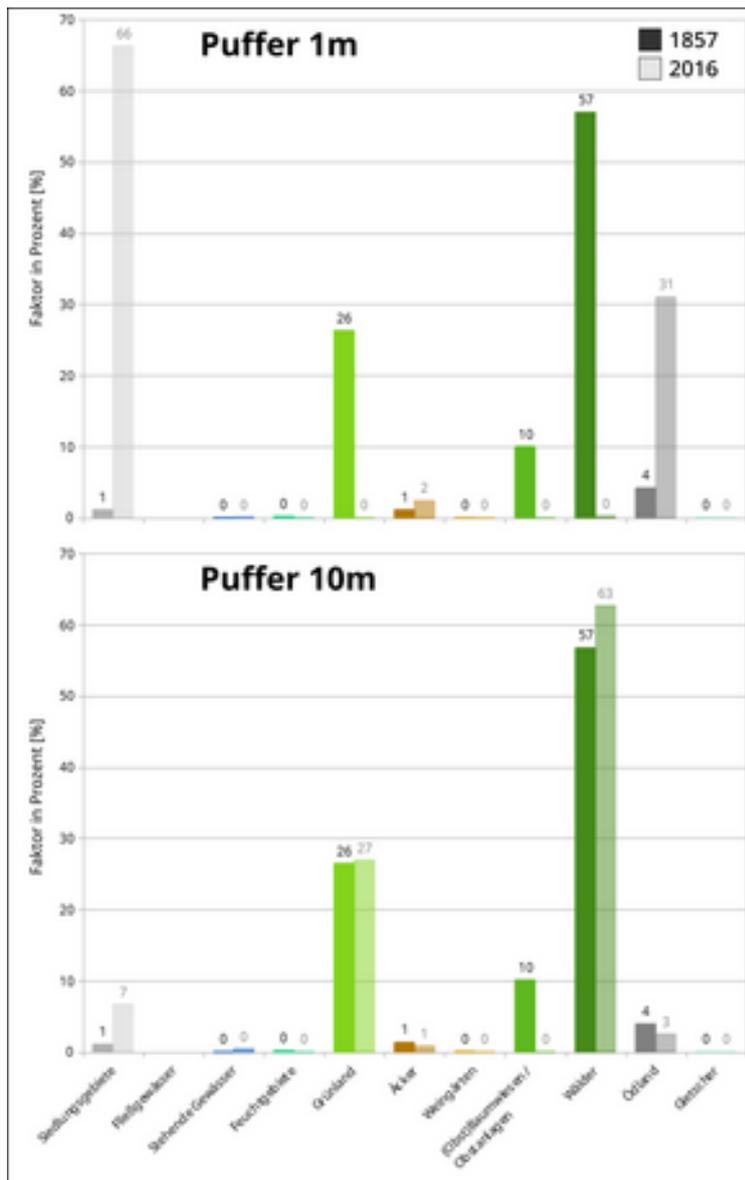


Abbildung 5.5: Ermittlung des Gewichtungsfaktors durch Pufferung – starke Unterschiede je nach Puffergröße erkennbar

Drittelmethode

Dieser Methode ging die pauschale Annahme voraus, dass außerhalb liegende Fließgewässer zu $\frac{2}{3}$ durch Wälder und zu $\frac{1}{3}$ durch Grünland verlaufen. Im GIS wurde somit die historische HQ300-Fläche mit den *Fließgewässern* verschnitten. Die übrigbleibende Fließgewässerfläche wurde gedrittelt und einerseits von den Klassen *Grünland* und *Wald* anteilmäßig abgezogen, andererseits der Klasse *Fließgewässer* zugerechnet.

Puffermethode

Zum Vergleich wurde diese Differenz an Fließgewässern im GIS über die Pufferfunktion mit dem historischen Datensatz verschnitten. Die so innerhalb des Puffers erhaltene Landbedeckungsverteilung wurde als Gewichtungsfaktor für die Einberechnung der außerhalb des HQ300 liegenden *Fließgewässer* herangezogen. Dieses Verfahren wurde sowohl mit einer Pufferung von 1m als

auch 10m vollzogen. Praktisch wurde ein 1 und 10m breites Band um die außerhalb der HQ-Flächen liegenden Fließgewässerflächen gezogen, in weiterer Folge die Klasse *Fließgewässer* aus diesen neu erhaltenen Bereichen ausgenommen, um schlussendlich diese Flächen aus dem Layer *Landbedeckung 1857* auszuclippen. Das Verhältnis der Landbedeckungsklassen innerhalb des Pufferbereiches konnte somit als repräsentative Verteilung der Landbedeckung in den betreffenden Gebieten herangezogen werden. Interessant ist hierbei die ziemlich unterschiedlich ausfallende Gewichtung je nach Pufferungsausmaß (Abb. 5.5).

Diese Methode ist nur eine grobe Annäherung, könnte jedoch, anhand einer Nachbarschaftsanalyse verfeinert, auch zur automatischen Reklassifizierung des GIS-

Datensatzes herangezogen werden, um brauchbare Ergebnisse für die Anwendung in der Geoinformatik zu liefern. Der Aufwand dafür geht bei dieser Arbeit jedoch über die Zweckmäßigkeit hinaus.

Aufgrund des Ermittlungsaufwandes der Puffermethode, relativ geringer Unterschiede zur Drittmethode sowie der vergleichsweise geringfügigen Ausdehnung des Fließgewässerfehlers und somit geringfügigen Auswirkung auf den gesamten Datensatz (historisch 5,5%, aktuell 2,9% der gesamten Klasse Fließgewässer) wird das Ergebnis der Drittmethode als Fehlerermittlungsmethode angewandt und bei der Behandlung des Franziszeischen Katasters weiterempfohlen.

Weiters angemerkt sei an dieser Stelle, dass der so korrigierte Datensatz zwar zur generellen Flächenstatistik herangezogen wird – bei weiterführenden lokalen GIS-Analysen in Ermangelung einer bereichsweisen exakten räumlichen Verortung dieses Fehlers aber Vorsicht geboten ist.

5.3.2 Aktuelle Hochwassergefährdungszonen

Die Lücken zwischen den genannten Datensätzen wurden mittels Überprüfung von Orthofotos und Geländemodell (DGM 10m) im GIS geschlossen (vgl. auch Kap. 4.3). Zuletzt wurden Seen und Teiche aus den ermittelten Überflutungsgebieten ausgeschnitten. Da auch im aktuellen Überflutungsgebietlayer aufgrund der Beschaffenheit der Daten ein Fehler bezüglich der Fließgewässer analog zu den historischen HQ-Zonen nicht ausgeschlossen werden kann, wurde gleichermaßen die „Drittmethode“ angewandt, um diesen Fehler zu minimieren. In diesem Fall handelt es sich um eine weitaus geringere Flächendivergenz (47ha) zwischen innerhalb und außerhalb der HQ-Zonen liegenden Fließgewässer.

5.4 Schritte zur Analyse des Landschaftswandels

Neben einer Flächenbilanz (Kap. 6.1) für das gesamte Untersuchungsgebiet wurden auch eine Transformationsanalyse der verschiedenen Landbedeckungsklassen (Kap. 6.3) sowie eine Höhenauswertung vorgenommen (Kap. 6.2). Die Transformationsanalyse extrahiert die Information welche aktuelle Landbedeckungsklasse eine historische Landbedeckungsklasse verdrängt bzw. abgelöst hat oder welche Landbedeckung im Falle einer „flächentreue“ konstant an historischer Stelle vorzufinden ist. Im Zuge der Höhenauswertung erfolgt zum Einen eine Bilanzierung der Flächen in drei Höhenstufen (395-1500, 1500-2500, 2500-3312müA) in Kapitel 6.2.1 und zum Anderen eine graduelle Höhenanalyse aussagekräftiger Landbedeckungsklassen (Kap. 6.2.2).

5.4.1 Analyse des Landschaftswandels im HQ300-Einflussbereich

Um die räumlichen Phänomene des Landschaftswandels im unmittelbaren Einflussraum der Fließgewässer zu extrahieren, wird parallel zum gesamten Untersuchungsgebiet eine Flächenbilanz berechnet sowie eine kurze Analyse der Daten nach folgenden weiteren Kriterien bewerkstelligt:

- **Transformation (Kap. 6.4.2)**

Parallel zu Transformationsuntersuchungen des gesamten Untersuchungsgebietes wird eine solche Analyse auch für den Überflutungsraum durchgeführt.

- **Veränderung des HQ300-Einflussbereiches (Kap. 6.4.3)**

Welche Bereiche waren historisch von Überflutung betroffen und sind dies heute nicht mehr – bzw. welche neuen Überflutungsräume sind hinzugekommen?

- **Rheinregulierung (Kap. 6.4.4)**

Um zu verdeutlichen, welche Auswirkungen die Rheinregulierung im Mündungsbereich des Bodensees hat, wird hierzu eine nähere Analyse der stehenden Gewässer im Zusammenspiel mit dem HQ300-Einflussbereich getätigt.

- **Auswertung des Überflutungsraumes nach Höhenstufen (Kap. 6.4.5)**

Letztlich werden die Landbedeckungsklassen im HQ300-Raum in Bezug auf ihre vertikale Verteilung betrachtet. Dazu werden diese in 500m Schritten unterteilt und deren prozentueller Anteil an der jeweiligen Höhenstufe ähnlich der Betrachtung des Untersuchungsgebietes nach Höhenstufen gegenübergestellt, sowie eine graduelle Höhenanalyse aussagekräftiger Landbedeckungsklassen ausgeführt.

5.5 Beobachtungsmaßstab

Nach Aggregation der Daten können Aussagen auf Quadratkilometerbasis getroffen werden. Eine feingliedrigere Auswertung ist nur bedingt möglich.

Ergebnisse werden demnach größtenteils auf Quadratkilometer gerundet und Aussagen daraufhin getroffen. Die verwendete Methode zur Erhebung der aktuellen Flächenbilanz könnte hinsichtlich der Klasse Weingärten und Obstanlagen nachgeschärft werden. Für die Klasse Weingärten ist der anteilige Einfluss innerhalb des Untersuchungsgebietes eher gering. Die Gegenüberstellung der Klasse (Obst)Baumwiesen und Obstanlagen ist mit Vorsicht zu treffen, da die historisch locker bestandenen Baumwiesen (zum Teil Krummholzflächen in hochalpinen Lagen) und die aktuell vorhandenen intensiv bewirtschafteten Obstanlagen in ihrer Verbreitung, Form und Dominanz im Beobachtungsgebiet recht verschieden sind. Genauere Erläuterungen hierzu und weitere Besonderheiten der verwendeten Daten finden sich in Kap. 7.1.

6 Resultate

6.1 Flächenbilanz Untersuchungsgebiet

Die Landbedeckungskategorie mit der größten Ausdehnung ist historisch (948km²) wie aktuell (996km²) das Grünland mit einem absoluten Zuwachs von 48km². Eine heute mit 984km² ähnlich große Fläche bedeckt die Klasse Wald, welche bezogen auf die historische Ausdehnung (623km²) mit 361km² bzw. +58% den flächenmäßig höchsten Zuwachs im Rhein-EZG in Vorarlberg aufweist. Prozentuell ist der Zuwachs bei der Klasse Siedlungsgebiet noch wesentlich eklatanter, welche von historischen rund 9km² auf rund 83km² nunmehr 917% des ursprünglichen Wertes ausmacht. Das höchste Defizit wiederum weist die Klasse der (Obst)Baumwiesen auf, deren Fläche von historischen 281km² auf heutige 0,6km² zurückgegangen ist. Ein nicht so eklatantes, jedoch hervorstechendes Defizit erfuhr auch die Klasse Äcker, welche mit einer Fläche von 28km² auf knapp 20% der ursprünglichen Ausdehnung (143km²) verringert wurde (vgl. Abb. 6.1 6.2 6.3). Die zusammenfassende Darstellung der Flächenbilanz in absoluten und relativen Werten ist in Abbildung 6.5 ersichtlich.



Abbildung 6.1: Landbedeckungsklassen (Farbkodierung)



Abbildung 6.2: Landbedeckung 1857

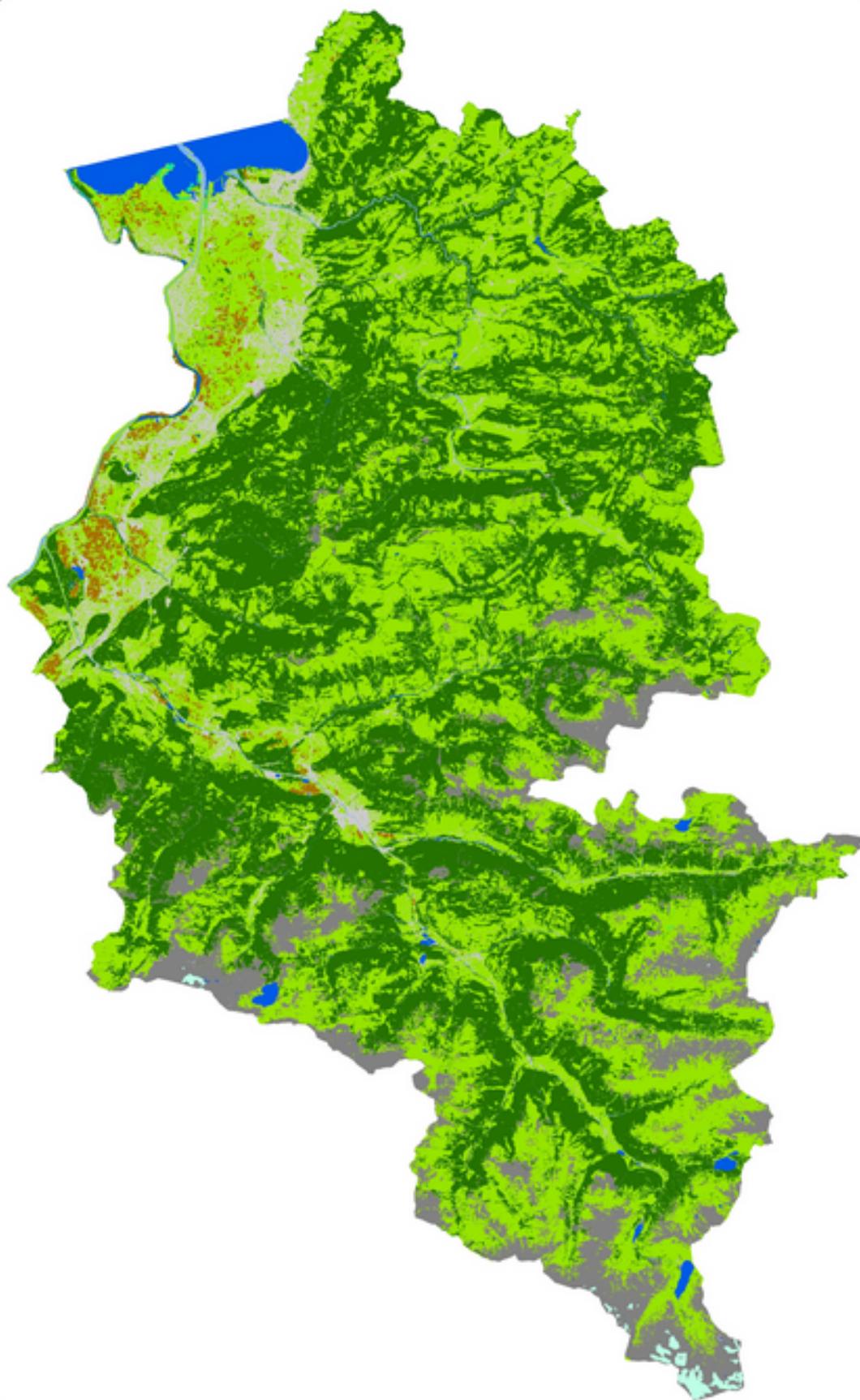


Abbildung 6.3: Landbedeckung 2016

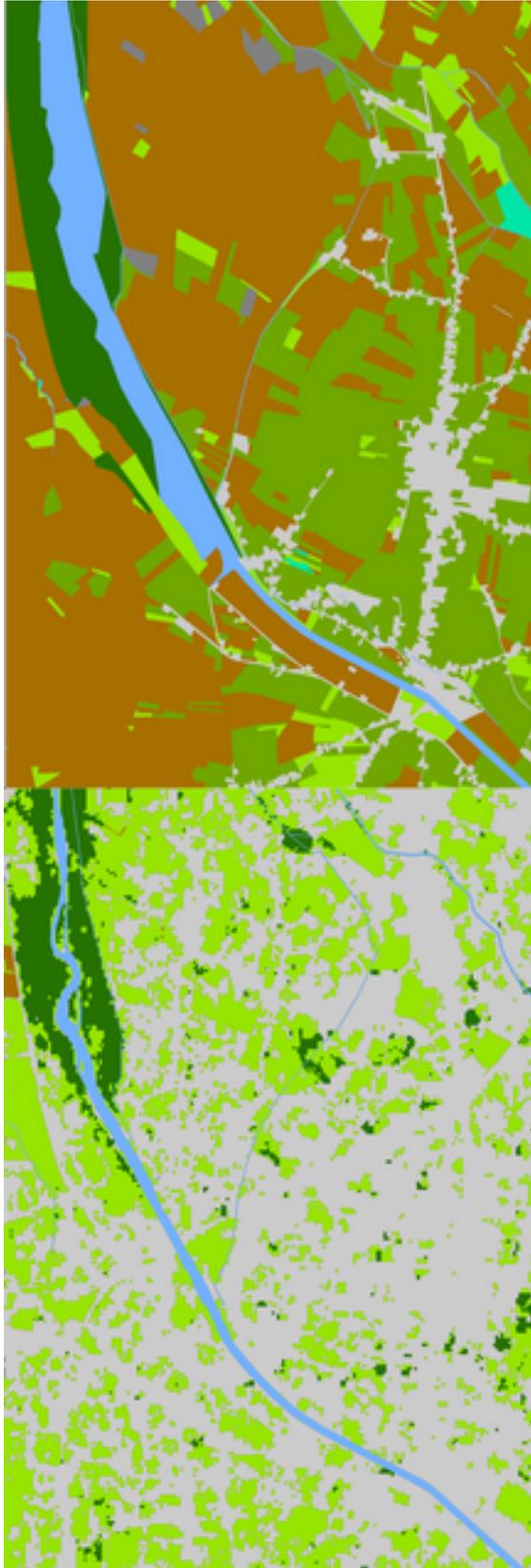


Abbildung 6.4: Ausschnitt Dornbirn – Landbedeckung 1857 (oben) und 2016 (unten)

Siedlungsgebiet

Die historischen Siedlungsgebiete erstrecken sich auf 0,4% des Rhein-EZG in Vorarlberg mit einer Fläche von 9km². Heute nimmt diese Klasse 3,5% und 83km² im Untersuchungsgebiet ein (vgl. Abb. 6.4).

Fließgewässer

Die historische Ausdehnung der Fließgewässer betrug 1,6% des gesamten Untersuchungsgebietes und damit rund 39km². In den knapp 160 Jahren, welche diese Beobachtung überspannt, erfolgte eine Schrumpfung auf 43% der historischen Werte auf 17km² bzw. 0,7% des Untersuchungsgebietes.

Stehende Gewässer

Die stehenden Gewässer weisen mit 9% Zuwachs eine positive Flächenbilanz auf. Von historischen rund 37km² hat sich die Gesamtfläche aller stehender Gewässer im Rhein-EZG Vorarlberg auf rund 41 km² vergrößert.

Feuchtgebiete

Von der historischen Ausdehnung der Feuchtgebiete von 7km² sind mit knapp einem Quadratkilometer gerade 14% übriggeblieben.

Grünland

Das Grünland ist die dominierende Landbedeckung im Untersuchungsgebiet. Die historische Ausdehnung von 948km² hat mit 5% Zuwachs heute eine Ausdehnung von 996km² und bildet heute 42% des Untersuchungsgebietes ab.

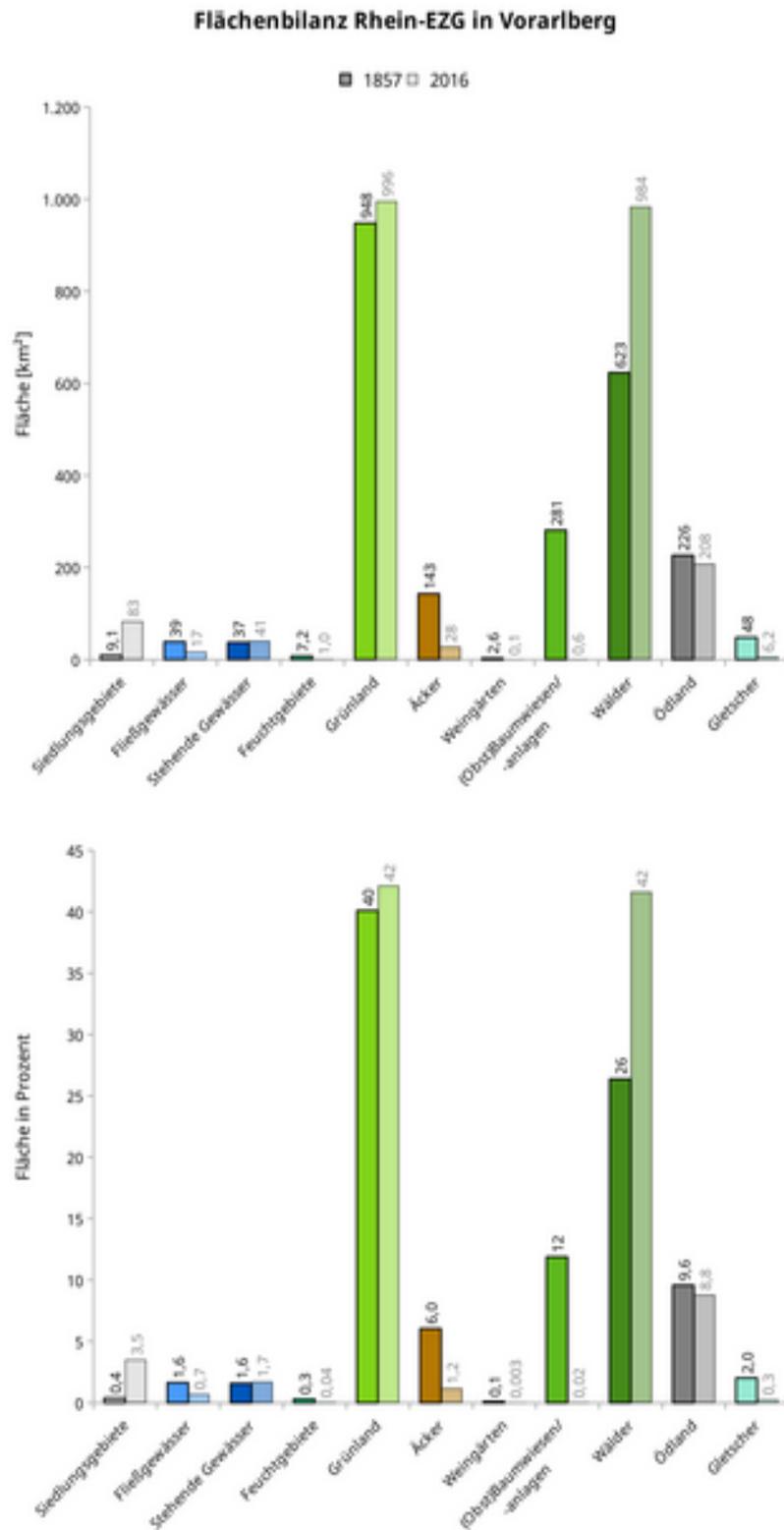


Abbildung 6.5: Flächenbilanz im Rhein-EZG 1857 (dunkel) und 2016 (hell) dargestellt nach Klassen in km² (oben) und Prozentwerten (unten) - (Weiterführende Erklärungen zu „Ausreissern“, verursacht durch Landbedeckungskategorie (Obst)Baumwiesen / Obstanlagen in Kap. 7.1)

Äcker

Die Klasse Äcker ist von 143km² auf 28km² Ausdehnung im Untersuchungsgebiet zurückgegangen. Dieser erhebliche Rückgang (-80%) deutet auf die Entwicklung vom agrarisch geprägten vorindustriellen Alpenland zum heute durchaus industriell geprägten, global vernetzten Bundesland hin.

Weingärten

Die Änderung von der historischen zur heutigen Fläche entspricht 0,1% des Untersuchungsgebietes. Eine weitere Auswertung hinsichtlich der Weingärten ist hinfällig, da die 1857 erhobene Fläche von 2,6km² auf 70ha zusammengeschrumpft ist und in Anbetracht des Beobachtungsmaßstabes keine sinnvollen Schlüsse daraus gezogen werden können. Es ist jedoch festzustellen, dass auch in den wärmebegünstigten Tallagen des Alpenraums der Weinbau für den Hausgebrauch eine Rolle gespielt hat.

(Obst)Baumwiesen - Obstanlagen

Die Klasse (Obst)baumwiesen ist heute als Obstanlage wesentlich enger definiert als früher, wo auch hochalpine Krummholzzonen miteinbezogen wurden. Daher ist der Vergleich hier nicht aussagekräftig (vgl. Kap. 7.1). Die Klasse ist heute mit (0,6km²) nur mit 0,2% der Ausdehnung 1857 (281km²) im Rhein-EZG in Vorarlberg vertreten. Die Landschaftsausprägung locker bestockter mehrfach genutzter Wiesen hat kulturell an Bedeutung verloren und stellt zudem für satellitengestützte Landbedeckungsklassifikation eine Herausforderung dar. Mehr Aufschluss hinsichtlich dieser Klasse ergeben Analysen in Verbindung mit der Klasse der Wälder.

Wälder

Der Großteil der historisch als Baumwiesen ausgewiesenen Flächen wurde im aktuellen Datensatz den Wäldern zugeschlagen. Die Klasse der Wälder hat von den Ausmaßen Mitte des 19. Jahrhunderts (623km²) zur heutigen Ausdehnung (984km²) zugelegt und bildet im Gegensatz zum historischen Zustand (26%) heute 42% des gesamten Untersuchungsgebietes ab. Auch bei kombinierter Betrachtung mit den (Obst)Baumwiesen ist eine Zunahme der Waldfläche um rund 80km² erkennbar.

Ödland

Die Flächenbilanz der Klasse Ödland ist geringfügig negativ. So ging die Ausdehnung von 226km² Mitte des 19. Jahrhunderts um 8% auf heutige 208km² zurück.

Gletscher

Von der Ausdehnung der Gletscher um 1857 (48km²) sind heute noch knapp 13% bzw. rund 6km² übrig.

6.2 Höhengauswertungen

6.2.1 Flächenbilanz nach Höhengstufen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Flächenbilanz in drei Höhengstufen unterteilt (Abb. 6.6). Das hierzu verwendete DGM beschränkt sich jedoch auf heutiges Staatsgebiet und deckt somit das Untersuchungsgebiet nicht vollumfänglich ab und spart somit insbesondere im Grenzgebiet Flächen in einem Ausmaß einiger Hektar aus den folgenden Betrachtungen aus. Es kommt daher zu geringfügigen Unterschieden im Flächenausmaß innerhalb dieser Betrachtung nach Höhengstufen und den bisherigen Flächenbilanzen des gesamten Untersuchungsgebietes (Kap. 4.4). Nichtsdestotrotz gibt das Verhältnis der Klassen und Höhengstufen zueinander ein schlüssiges Bild über die Entwicklung der Landbedeckung über die Zeit (Abb. 6.8 & 7.2). Weiters kann diese Betrachtung in Verbindung mit ermittelten Verhältnissen des HQ300-Ereignisraumes in Kap. 6.4.5 Aufschluss über die Landbedeckungsdynamik erbringen.



Abbildung 6.6: Unterteilung des Untersuchungsgebietes in drei Höhengstufen 395-1500m (orange), 1500-2500m (rot) und 2500-3312m (dunkelrot)

Die Höhengstufenabgrenzung erfolgt folglich von 395-1500m, 1500-2500m und 2500-3312m über Adria. Dies betrifft 1.473km² bis 1500m, 838km² zwischen 1500 und 2500m und 51,5km² über 2500m. Die drei Kategorien bilden dementsprechend rund 62%, 35% und 2% des gesamten Untersuchungsgebietes ab. Die zuvor bereits erwähnten methodischen Probleme, dass die historische Klasse (Obst)Baumwiesen auch locker gehölzbestandene Weiden bzw. Bereiche mit Krummholz inkludiert, im aktuellen Datensatz die LISA-Kategorie „bushes and shrubs“ aber eher Wäldern entspricht, spielt auch bei der höhengzonalen Analyse eine Rolle. In der Höhengstufenauswertung werden die Klassen daher gemeinsam als Flächen undifferenzierter Bestockung (Obstbaumwiesen + Wälder) ausgewertet. Die Ergebnisse der Klasse Grünland sind unter diesem Umstand auch mit Vorsicht zu betrachten, weil die historischen (Obst)Baumwiesen theoretisch auch als Grünland gerechnet werden könnten. Die im Hochgebirge über 2500m relevanten Klassen in diesen Höhengstufen sind Grünland, Ödland, Wälder (historisch auch (Obst)Baumwiesen) und die Gletscher. Während die übrigen Klassen verstärkt unter 1500m anzutreffen sind (Abb. 6.7 & 6.9):

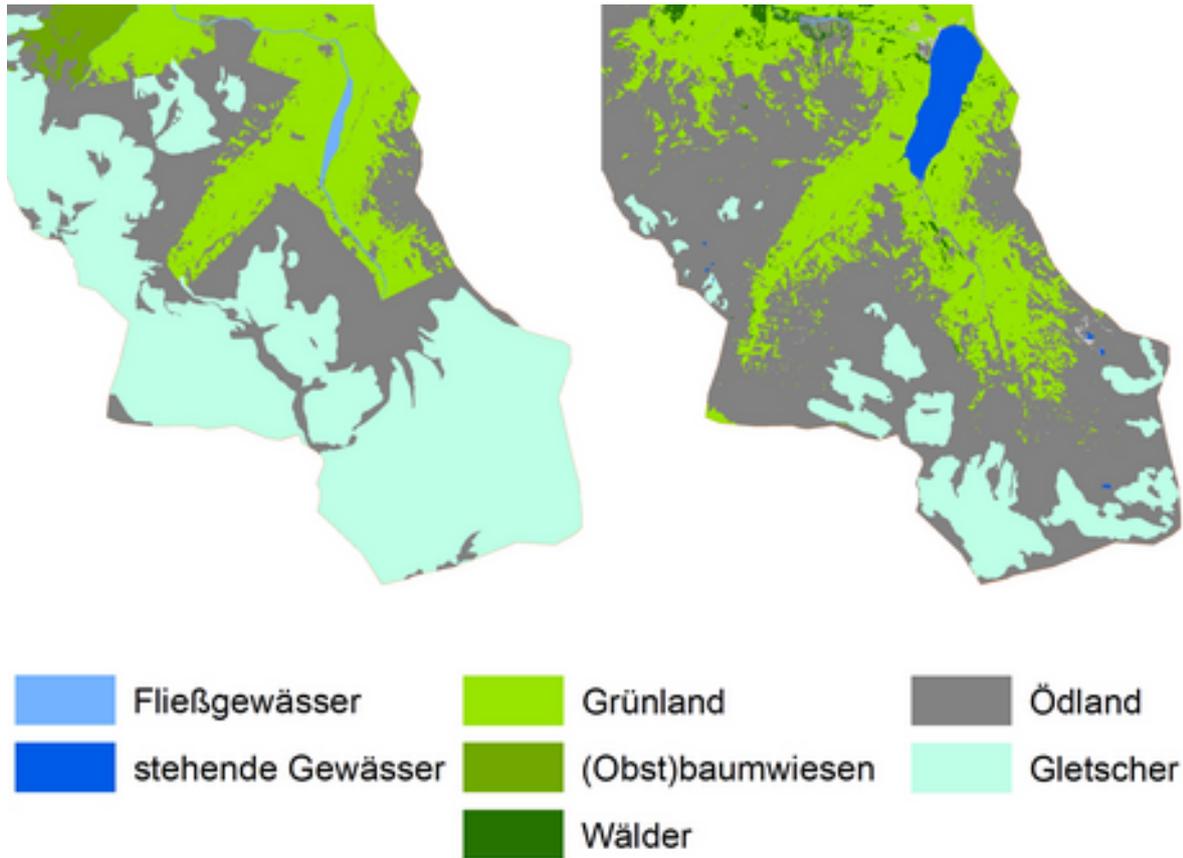


Abbildung 6.7: Landbedeckung im Hochgebirge - Ausschnitt Silvretta – 1857 (links) - 2016 (rechts)

Die Siedlungsgebiete erfahren Zuwächse über alle Höhenstufen. Rund 73km² unter 1500m, in der mittleren Höhenstufe 1,12km² und im Hochgebirge rund 5ha (Abb. 6.8). Die Fließgewässerfläche hat unterhalb 2500m abgenommen (minus 21,5km² in der untersten Höhenstufe, minus 38ha zwischen 1500 und 2500müA) und fehlt sowohl historisch als auch aktuell im Hochgebirge (aufgrund des bereits besprochenen Fließgewässerfehlers und der geringen Detailtreue im Hochgebirge zu erklären – weiteres in Kap. 7.1). Die stehenden Gewässer verzeichnen in tieferen Bereichen einen Schwund von 20ha, während in der mittleren Höhenstufe und über 2500m Zuwächse von 3,5km² und respektive rund 5ha zu verzeichnen sind. Dies spiegelt die Auswirkungen der Rheinregulierung sowie die Anlage von Speicherseen für die Energiewirtschaft wider. Die Feuchtgebiete sind unterhalb von 1500m um 6,1km² und in der mittleren Höhenstufe um 10ha zurückgegangen während über 2500m ü. Adria sowohl 1857 als auch 2016 keine Feuchtgebiete vorkommen. Somit sind in der untersten Stufe nur noch knapp 13% der historischen Feuchtgebietsausdehnung vorhanden. Das Grünland hat unter 1500m und über 2500m Zuwächse zu verzeichnen, während im mittleren Bereich eine Abnahme von 20km² (-5%) stattgefunden hat. Die Zuwächse über 2500müA entsprechen mit rund 1,5km² mehr als einer Verdoppelung des historischen Ausmaßes (+134%), während bis 1500müA ein Plus von 66km² einem Zuwachs um 13% im Vergleich zur historischen Grünlandfläche in dieser Höhenstufe entspricht (vgl. Abb. 6.8). Die Äcker sind unterhalb von 1500m stark zurückgegangen auf ein Fünftel der

historischen Ausdehnung (minus 115km²), während diese Klasse zwischen 1500m und 2500m aktuell mit 1,7ha ca. gleich schwach wie historisch vertreten ist. Der Weinbau ist gänzlich unterhalb von 1500m anzutreffen und erfuhr ein Minus von rund 2,5km². In absoluten Zahlen nicht dramatisch, so ist der Weinbau auf heutige rund 70ha und somit knapp 3% seiner historischen Ausdehnung im gesamten Untersuchungsgebiet reduziert worden.

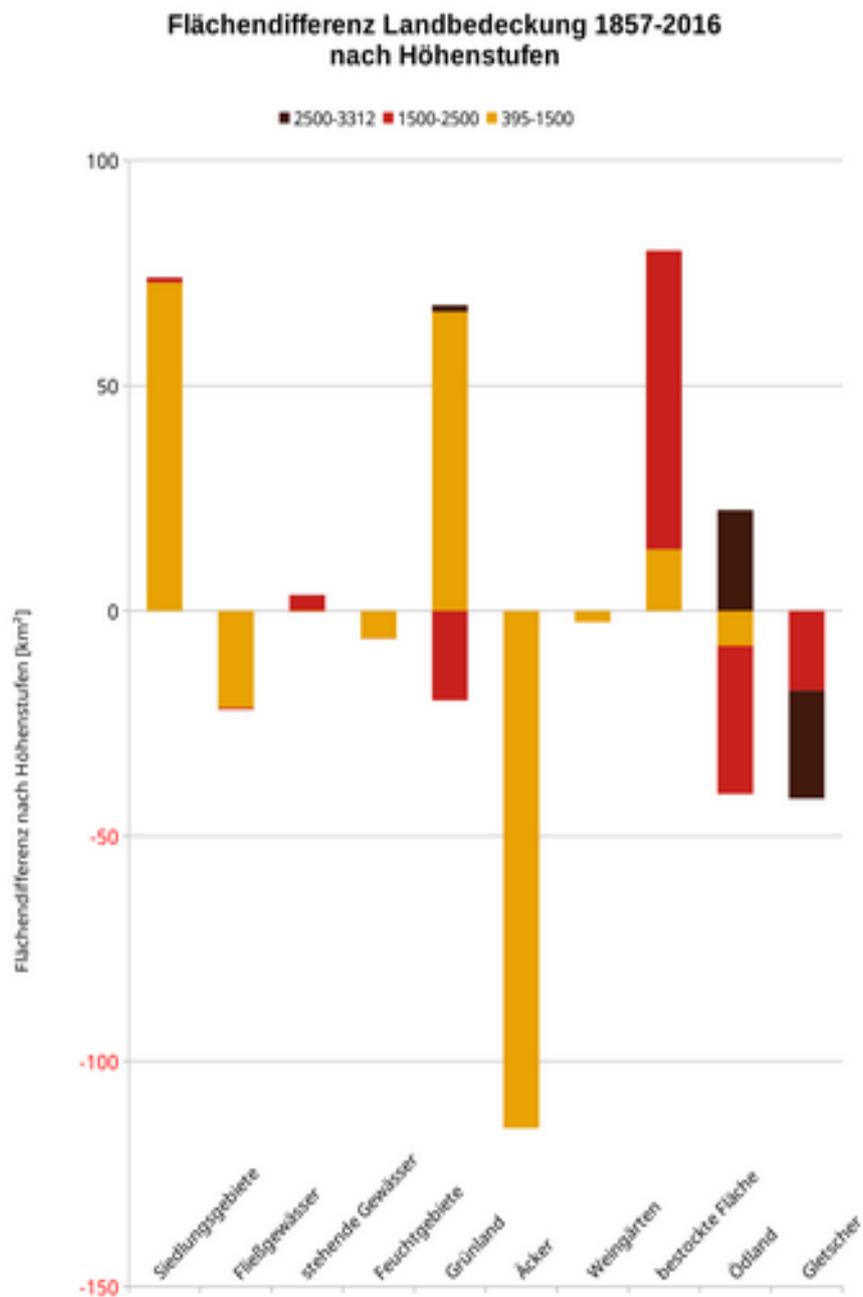


Abbildung 6.8: Abnahme bzw. Zunahme in km² der jeweiligen Landbeckungsklasse in den verschiedenen Höhenstufen zwischen 1857 und 2016

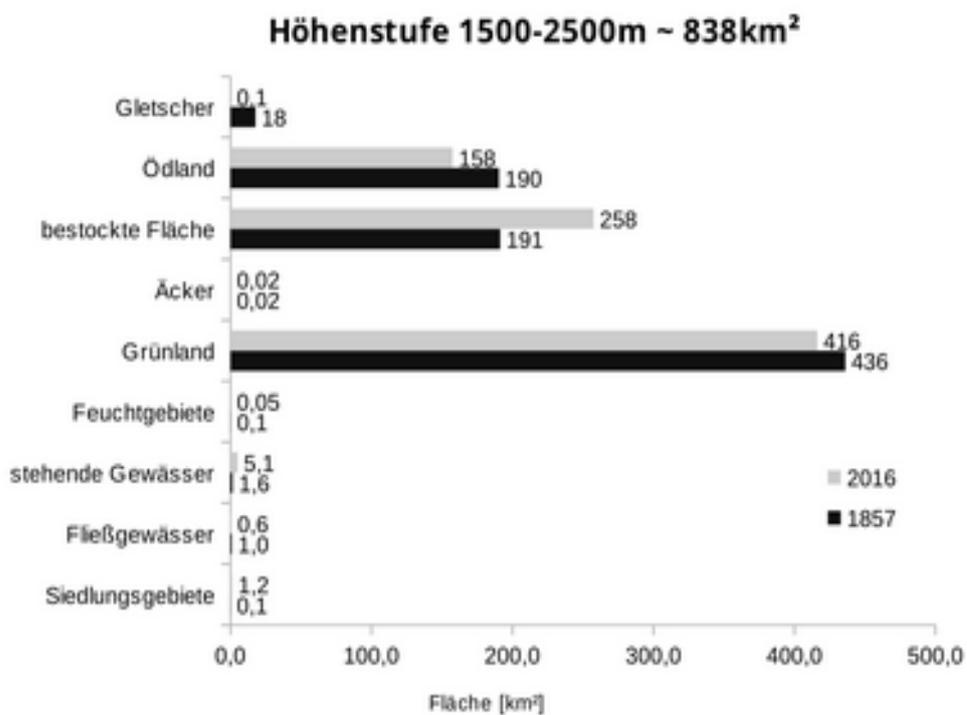
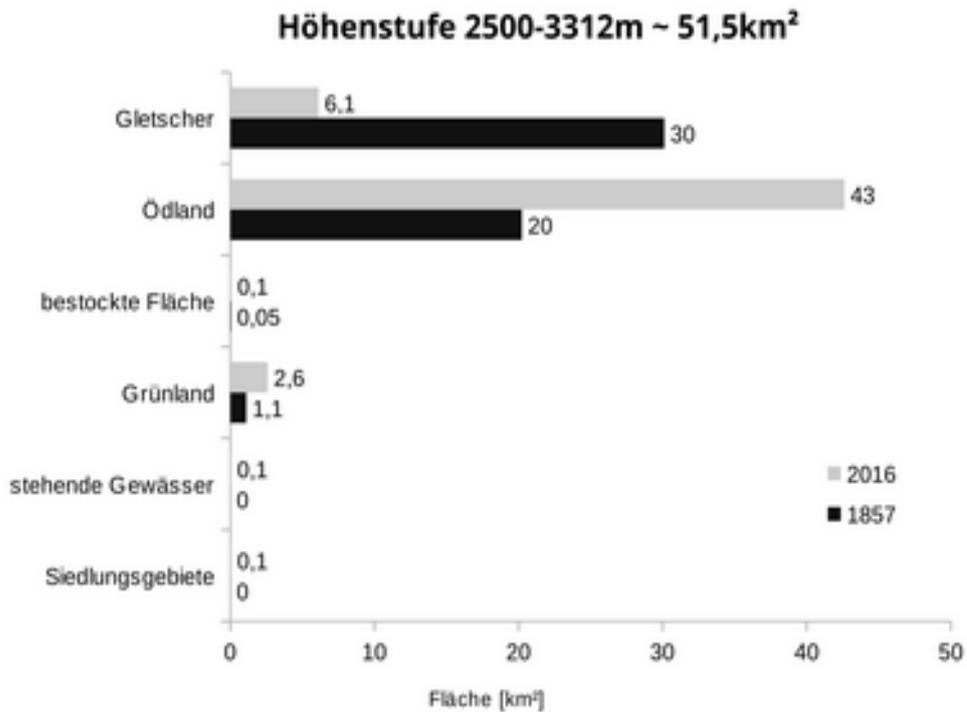


Abbildung 6.9: Vergleich der Landbedeckung 1857 & 2016 nach Höhenstufen – über 2500m (oben) und zwischen 1500-2500m (unten) – Werte auf km² gerundet

Die bestockten Flächen haben über alle Höhenstufen zugenommen. Unter 1500m um rund 14km², in der mittleren Höhenstufe um rund 66km² und im Hochgebirge um rund 2ha, was prozentuell Zuwächsen von 2%, 35% und 43% entspricht. Ödlandflächen haben unterhalb von 2500m abgenommen. Das Ödland erfuhr unter 1500m ein Minus von rund 7,8km² und zwischen 1500m und 2500m ein Minus von rund 33km². Über 2500m jedoch kam es zu einer Zunahme von rund 22,4km². Dies entspricht minus 49%, minus 17% und plus 110%. Die Gletscherausdehnung kann historisch wie aktuell ausschließlich über 1500m Seehöhe beschrieben werden. Die Gletscher erfuhren über beide Höhenstufen eine Abnahme. Zwischen 1500 und 2500m nahm ihre flächige Erstreckung um rund 17,7km² ab, während über 2500m eine Abnahme von rund 24km² stattfand. Die heutige Ausdehnung der Gletscher entspricht somit rund 0,35% unterhalb 2500m und 20% über 2500m der historischen Gletscherfläche (vgl. Abb. 6.9 und Abb. 6.10).

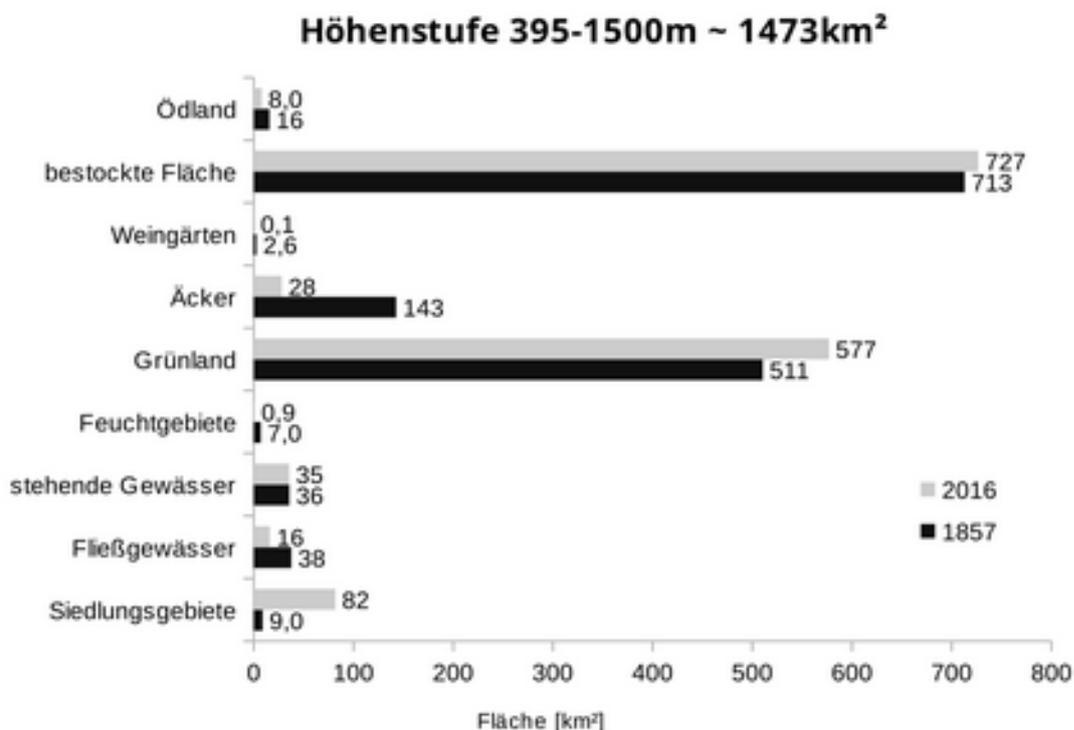


Abbildung 6.10: Vergleich der Landbedeckung 1857 & 2016 unterhalb 1500m – Werte auf km² gerundet

6.2.2 Graduelle Höhenauswertung ausgewählter Landbedeckungen

Durch die direkte Verschneidung des Digitalen Höhenmodells mit der historischen und aktuellen Landbedeckung kann eine graduelle Höhenverschiebung der jeweiligen Landbedeckungsklasse ermittelt werden. Hierzu werden nur ausgewählte Landbedeckungsklassen mit aussagekräftigen Höhenverschiebungen herangezogen und wie in der Flächenbilanz nach Höhenstufen (Kap. 6.2.1) die (Obst)Baumwiesen und Wälder als bestockte Fläche zusammengefasst. Die Darstellung der Ergebnisse der graduellen Höhenauswertung (Abb. 6.11) erlaubt eine grafische Gegenüberstellung des Medians der Höhen der Landbedeckungsklassen und deren Flächenausmaß (km²). Die Pfeile zeigen Trends dieses Verhältnisses zwischen der Landbedeckung 1857 und 2016 auf. Die Trends der Höhenverschiebung, sowie die Einzeldarstellung der (Obst)Baumwiesen/-anlagen und Wälder neben der aggregierten Form sind in Abbildung 6.12 verdeutlicht.

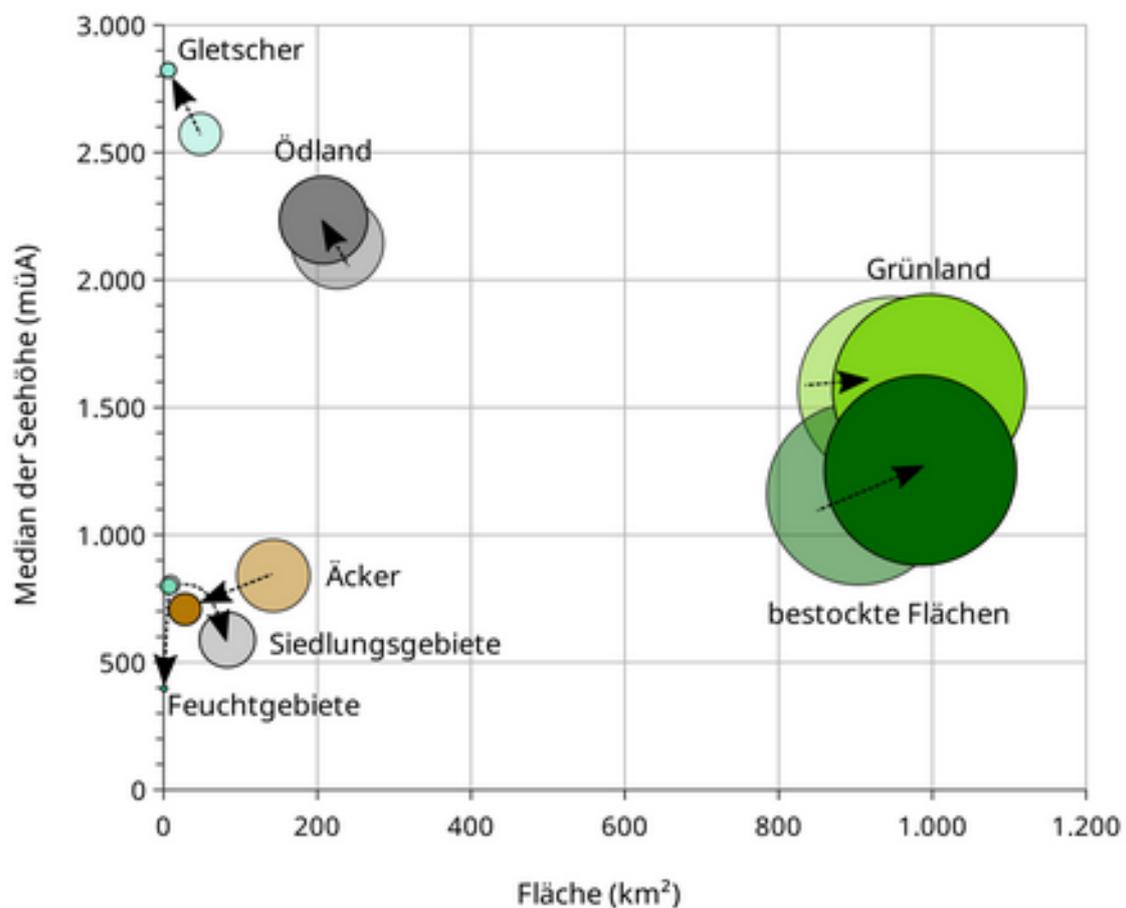


Abbildung 6.11: Höhenverschiebung (y-Achse) und Änderungen des Flächenausmaßes (x-Achse) ausgewählter Landbedeckungstypen zwischen 1857 (hell) und 2016 (dunkel). Die Höhen werden durch den Median der Landbedeckungsklasse abgebildet, Kugelgrößen bilden die relativen Veränderung des Flächenausmaßes der jeweiligen Landbedeckung ab. Pfeile zeigen die Entwicklung von 1857 nach 2016 auf.

Abwärtstrends der mittleren Höhe von Landbedeckungsklassen sind für die Klassen Siedlungsgebiete (-217m), Feuchtgebiete (-401m) und Äcker (-132m) feststellbar. Einen Anstieg der mittleren Höhe erfuhren die Klassen Gletscher (+251m), Ödland (+91m) und bestockte Flächen (+92m). Das Grünland ist aktuell mit nur einem Meter Anstieg der mittleren Höhe in einem sehr ähnlichen Höhenspektrum verteilt, wie dies 1857 der Fall war. Das Diagramm (Abb. 6.11) bringt weiters die in Kap. 6.1 erörterten und in Abbildung 6.5 numerisch dargestellten Änderungen des Flächenausmaßes der ausgewählten Landbedeckungsklassen zum Ausdruck. Auszugsweise davon ist eine Zunahme der bestockten Flächen (+80km²), der Siedlungsgebiete (+74km²) und des Grünlandes (+48km²) sowie eine Abnahme der Äckerfläche (-115km²), der Gletscher (-41,7km²), des Ödlands (-18,3km²) und der Feuchtgebiete (-6,2km²) anzumerken. Interessantes Detail hierbei ist das in diesem Größenverhältnis 1857 bestehende ‚Naheverhältnis‘ von Feucht- und Siedlungsgebieten. Im Laufe der 160 Jahre zwischen den Erfassungszeitpunkten der beiden Landbedeckungsdatensätze hat sich deren mittlere Höhe in eine ähnliche Richtung verschoben, das Flächenausmaß jedoch in die gegenläufige Richtung entwickelt. Wie aus Abbildung 6.12 hervorgeht, legt die Höhenverschiebung der Wälder und (Obst)Baumwiesen/-anlagen neben der aggregierten Form ‚bestockte Flächen‘ eine differenzierte Betrachtung des historischen und aktuellen Datensatzes bezüglich dieser Landbedeckungsklassen nahe.

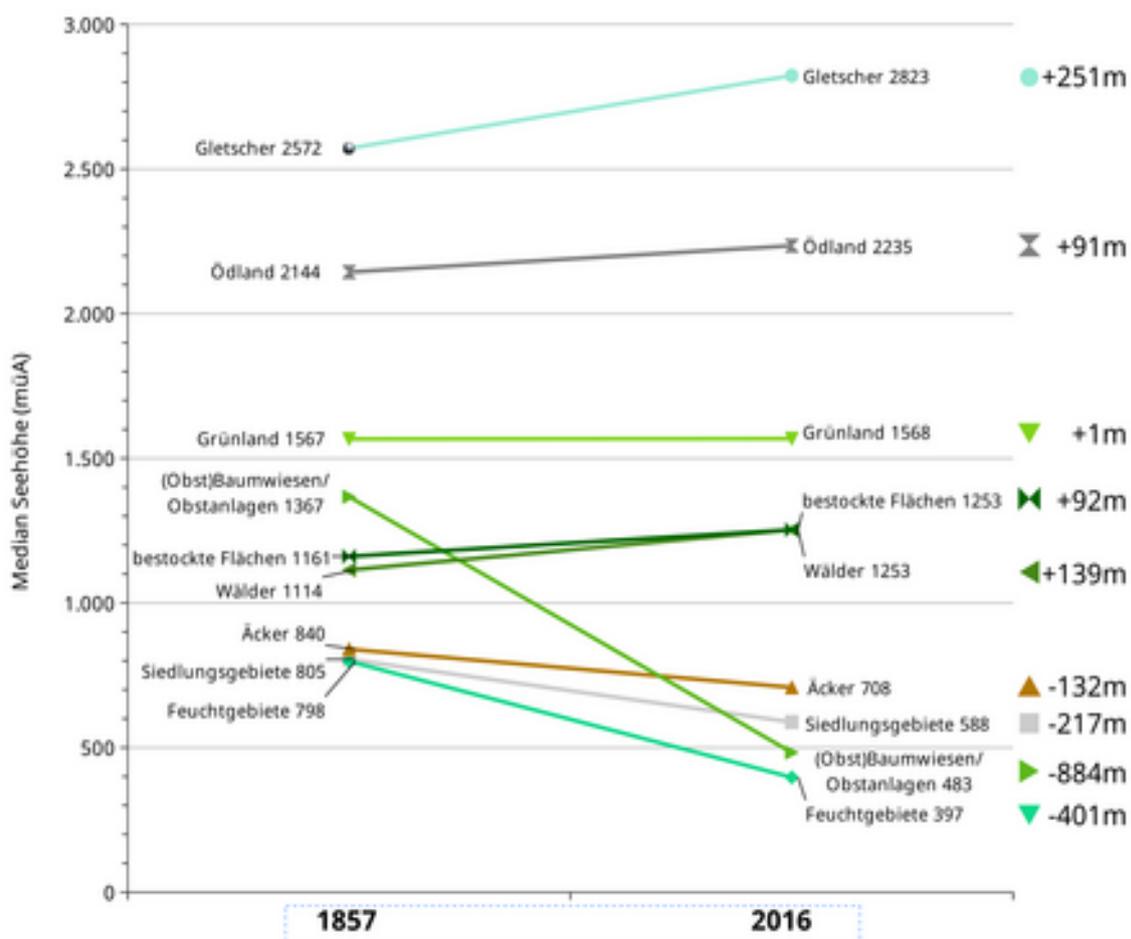


Abbildung 6.12: Verschiebung des Medians der Seehöhe je Landbedeckungsklasse zwischen 1857 (links) und 2016 (rechts)

6.3 Transformation - Was wurde aus der historischen Landbedeckung?

Um den Wandel der historischen Landbedeckung im gesamten Untersuchungsgebiet besser interpretieren zu können, wird eine Transformationsanalyse durchgeführt. Dazu erfolgt eine Verschneidung des historischen mit dem entsprechenden aktuellen Datensatz in ArcGIS.

Eine zu geringe Flächengröße für diese Untersuchung bringt die Klasse der Weingärten mit sich und wird mangels Aussagekraft hier vernachlässigt.

Im Folgenden werden Landbedeckungsklassen, welche heute dominant anstelle der historischen Nutzung stehen und somit durch den Landbedeckungswandel an Bedeutung gewonnen haben, als „Verdränger“ bezeichnet. Gleichzeitig kann durch diese Analyse ermittelt werden, welche Klasse eher flächentreuen Charakter aufweist (siehe Abb. 6.14). Zur Veranschaulichung sind in Abb. 6.13 beispielhaft Ausschnitte der Transformation im Bereich historischer Fließgewässer abgebildet.



Abbildung 6.13: Aktuelle Landbedeckung (rechts) auf historischem Fließgewässer (links) – Ausschnitt Ill Walgau

Siedlungsgebiet

Rund 41% (3,7km²) der historischen Siedlungsgebiete (9km²) sind heute nicht mehr dieser Klasse zuzuordnen. So erfuhren diese insbesondere durch die Klasse Grünland 37% (3,4km²) und 3% (30ha) Wälder eine neue Landbedeckung. Die verbleibenden knapp 0,9% (8ha) entfallen heute auf die restlichen Klassen. Es ist jedoch nicht davon auszugehen, dass alte Siedlungen großflächig abgerissen wurden, sondern hier ein Hinweis auf die Datenungenauigkeit in Bezug auf die exakte räumliche Verortung sowohl der historischen als auch der aktuellen Siedlungsflächen vorliegt. Weiteres dazu in der Diskussion der Daten in Kap. 7.1.

Fließgewässer

Die Flächentreue der Fließgewässer beläuft sich auf ca. ein Viertel, bzw. 27% (10km²) der historischen und aktuellen Fließgewässerfläche sind ident. Die 73% veränderte Landbedeckung verteilt sich auf 30% (12km²) Wälder, 25% (10km²) Grünland, 9% (3,7km²) Siedlungsgebiete, 4% (1,7km²) stehende Gewässer, 3% (1,2km²) Äcker sowie die zusammengefassten übrigen Landbedeckungsklassen 1,2% (47ha). Die geringe Flächentreue im hochalpinen Bereich gibt auch Hinweise auf die grobe Kartierung des historischen Datensatzes (ungenau Lage der Bäche) abseits der talnahen Gunstlagen und spiegelt damit teilweise einen methodisch bedingten Fehler wider (siehe Kap. 5.3.1 & Kap. 7.1).

Stehende Gewässer

Die Landbedeckung kann erwartungsgemäß als sehr konstant und flächentreu angesehen werden, da nur 11% der historischen stehenden Gewässer heute einer anderen Klasse zuzuordnen sind. So sind 5% (1,9km²) der historischen stehenden Gewässer heute Grünland, jeweils 2% Fließgewässer (87ha) und Siedlungsgebiete (83ha) sowie 1% (39ha) Feuchtgebiete. Die restlichen 0,6% (22ha) verteilen sich auf die übrigen Klassen.

Feuchtgebiete

Mit 99,7% Veränderung gegenüber der historischen Landbedeckung hat die Klasse Feuchtgebiete die zweitgeringste Konstanz über die Zeit vorzuweisen. Auf 716ha früherer Feuchtgebiete sind knapp 2ha (0,3%) gleicher Klassenzugehörigkeit geblieben. Auf diesen Flächen sind heute zu 69% (5km²) Grünland, 11% (77ha) Wälder, 9% (67ha) Siedlungsgebiete, 8% (59ha) Äcker und 2% (12ha) stehende Gewässer. Die übrigen Kategorien teilen sich die verbleibenden 0,9% (7ha) der historischen Feuchtgebietsflächen auf. Da diese immer noch mehr als die aktuelle Feuchtgebietsfläche von 1,9ha ausmacht, seien auch diese aufgelistet: 4ha Fließgewässer, 2,7ha Weingärten (190m² Ödland, 30m² Obstanlagen).

Grünland

Das historische Grünland ist heute zu 32% (304km²) mit einer von der historischen Klasse abweichenden Klasse belegt. Den Löwenanteil an Landbedeckungsänderung erfuhr das historische Grünland (948km²) durch die Wälder mit 27% bzw. rund 255km². Weiters sind heute 2,7% (26km²) und 1,8% (17km²) ehemaligen Grünlands heute den Klassen Siedlungsgebiet und Äcker zuzuordnen. Verbleibende sechs Klassen (alle außer Gletscher) nehmen heute 0,7% bzw. rund 6,5km² des ehemaligen Grünlandes ein: 3,6km² entfallen auf stehende Gewässer, 1,9km² auf Fließgewässer und in weiterer Folge sind heute 40ha Feuchtgebiete, 36ha Obstanlagen, 25ha Ödland und 0,9ha Weingärten auf historischem Grünland vorzufinden.

Äcker

Die historischen Ackerflächen weisen heute zu 95% (135km²) andere Formen der Landbedeckung auf. So sind auf den historischen 143km² Äckern heute knapp drei Viertel dem Grünland (105km²), 17% den Siedlungsgebieten (24km²) und 3,6% Wälder (5km²) zuzuordnen. Die übrigen Landbedeckungsklassen belegen die restlichen 0,6% (0,9km²) der historischen Äcker.

(Obst)Baumwiesen - Obstanlagen

Die tiefgreifendste Transformation der Landbedeckung erfuhr der Datensatz hinsichtlich der Klasse (Obst)Baumwiesen / Obstanlagen. So sind heute nur 0,02% (4,7ha) Obstanlagen auf ehemaligen (Obst)Baumwiesen. Die heutige Landbedeckung auf historischen (Obst)Baumwiesen setzt sich zu in etwa ähnlich großen Anteilen aus Wäldern 134km² (48%) und Grünland 130km² (46%) zusammen. Dies entspricht den bereits angemerkten (vgl. Kap. 5.1 & 6.1) unterschiedlich definierten Datenzusammensetzung der Klasse (Obst)Baumwiese und den Obstanlagen. In der Diskussion (Kap. 7.1) wird hierauf näher eingegangen: Vorausgeschickt sei, dass der Grund für den offensichtlichen Transformationsprozess zum Teil auch in der unterschiedlichen Klassifizierung der historischen/aktuellen Landbedeckungsdaten liegt. Die Zuordnung der historischen Klasse der (Obst)Baumwiese zu den Klassen Grünland bzw. Wäldern wäre gleichermaßen in Erwägung zu ziehen. Nachdem heute diese Form der mehrfachen Landnutzung durch Einsatz großer Landmaschinen weitestgehend „unmodern“ geworden ist und keine direkt vergleichbare Kategorie gefunden werden konnte, sind die Resultate dieser Klasse hier dennoch so dargestellt.

Von den historischen (Obst)Baumwiesen sind aktuell 5,5% (15km²) Siedlungsgebiete ermittelt werden. Die restlichen Klassen füllen heute die übrigen 0,5% (1,5km²) der historischen (Obst)baumwiesen. Diese sind: 70ha Äcker, 47ha Fließgewässer, 27ha stehende Gewässer, 9ha Ödland, (0,6ha Feuchtgebiete, 70m² Weingärten).

Wälder

Mit 89% gleichbleibender Landbedeckung ist der Wald neben den stehenden Gewässern die flächentreueste Klasse im Datensatz. So befinden sich auf historischen Wäldern 623km² nach wie vor auf 554km² Wälder. 9% (58km²) der historischen Wälder sind heute Grünland und die restlichen knapp 2% (11km²) fallen auf die übrigen Klassen – diesen vorangehend die Siedlungsgebiete 0,9% (5,8km²) und in weiterer Folge 2,7km² Fließgewässer, 1,3km² Äcker, 1,2km² stehende Gewässer.

Ödland

Das Ödland hat eine sehr hohe Konstanz über die Zeit, nachdem nur 25% (57km²) eine Landbedeckungsänderung im aktuellen Datensatz aufweisen. So sind von den gesamten 226km² historischem Ödland 15% (33km²) Grünland und 10% (22km²) Wälder. Knapp 1km² entfällt heute auf die restlichen Landbedeckungsklassen.

Gletscher

Die rund 48km² ermittelten historischen Gletscher sind heute zu 87% (42km²) andersartig ausgeformt. Auf dem Großteil davon ist heute Ödland 78% (37km²) und Grünland 8% (4km²) vorzufinden. Die übrigen 44ha verteilen sich auf Wälder (24ha), stehende Gewässer (12ha) und Siedlungsgebiete (8ha). Das Auftreten der Klasse Siedlungsgebiete auf ehemaligen Gletscherflächen kann zum Einen mit tatsächlich vorhandener Infrastruktur zusammenhängen, zum Anderen auch auf einen Fehler in der Bildklassifikation im LISA Datensatz hinweisen.

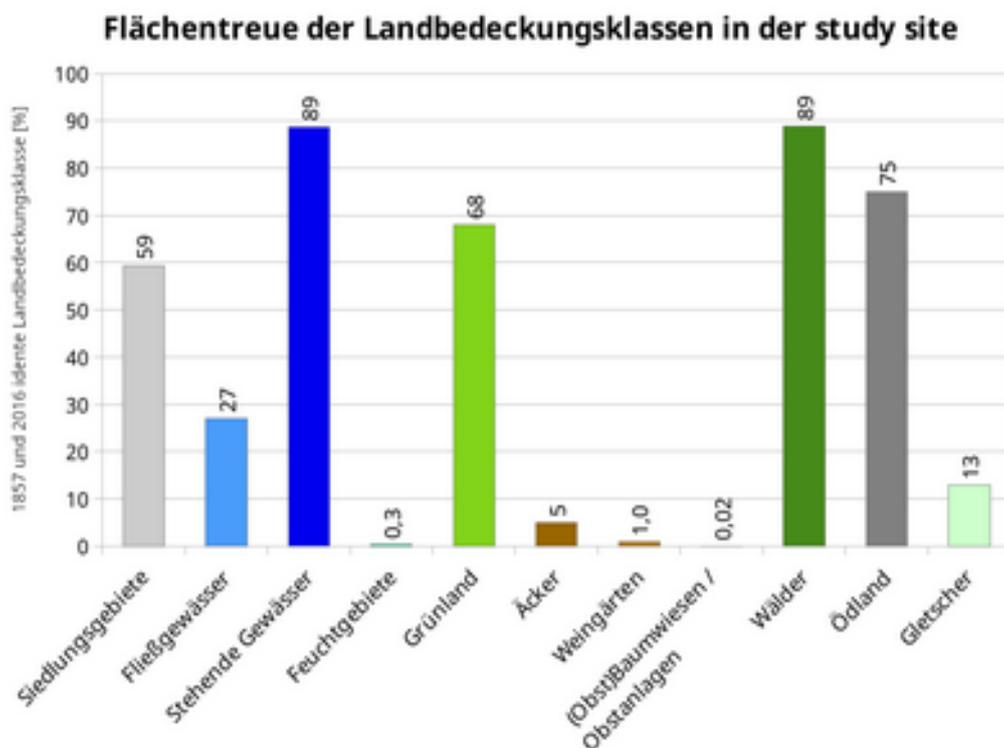


Abbildung 6.14: Flächentreue der Landbedeckungsklassen im Rhein-EZG Vorarlberg zwischen 1857 und 2016

6.4 Flächenbilanz Überflutungsgebiet bei HQ300



Abbildung 6.15: Landbedeckung 1857 im HQ300 Überflutungsgebiet



Abbildung 6.16: Landbedeckung (Farbkodierung)



Abbildung 6.17: Landbedeckung 2016 im HQ300 Überflutungsgebiet

Der Überflutungsraum im Falle eines dreihundertjährlichen Hochwassers ist von 315km² auf 78% seiner historischen Fläche auf aktuell 246km² zurückgegangen. Mitte des 19. Jahrhunderts betrug der Anteil des Überflutungsraumes am gesamten Einzugsgebiet 13%, wohingegen aktuell nur gut 10% der Fläche des vorarlbergischen Rhein-EZG im Falle eines dreihundertjährlichen Hochwassers von Überflutungen gefährdet ist (vgl. grafische Veranschaulichungen in Abb. 6.15 & 6.17)

Am meisten Fläche innerhalb dieses Gebietes kann heute dem Grünland zugeordnet werden - mit 132km² macht es über die Hälfte des aktuellen HQ300-Überflutungsgebietes aus. In weiterer Folge sind mit 19% (47km²) die Wälder sowie 14% (34km²) Siedlungsgebiete innerhalb des vom HQ300 erfassten Raumes stark vertretene Klassen. 7 bzw. rund 5% dieses Raumes nehmen aktuell die Fließgewässer mit 17km² und die Äcker mit 13km² ein. (vgl. Flächenbilanz in km² Abb. 6.18 & in Prozent Abb. 6.19)

Siedlungsgebiet

Waren historisch knapp 4km² dieser Klasse im Einflussbereich eines HQ300-Ereignisses, so sind heute 34km² und somit das 8,5-fache der historischen Fläche betroffen. Diese Wachstumsrate übersteigt die übrigen Klassen um ein Vielfaches. Waren historisch 44% aller im Einzugsgebiet des vorarlbergischen Rheins gelegenen Siedlungsgebiete vom HQ300-Ereignis betroffen, so sind heute 41% des aktuellen Siedlungsgebietes gefährdet (bei wesentlich größerem absoluten Flächenausmaß).

Fließgewässer

Alle Fließgewässer des Untersuchungsgebietes sind im HQ300-Datensatz enthalten. Historisch konnte mit dieser Klasse 12% des vom HQ300-Ereignis gefährdeten Raumes abgebildet werden - heute nehmen die Fließgewässer nur knapp 7% des HQ300-Gebietes ein, das sind mit 17km² rund 43% des historischen Wertes (39km²).

Stehende Gewässer

Die stehenden Gewässer sind per Definition aus den HQ300-Gebieten ausgeschlossen und wurden soweit möglich aus dem Datensatz entfernt. Bei den hier beschriebenen Gewässern handelt es sich um kleine Teiche die bei der Erstellung des Datensatzes übergangen wurden. Folglich sind stehende Gewässer nur in einem sehr geringen Ausmaß betroffen und liegen historisch mit ca. 3,7ha und aktuell 1,9ha innerhalb des Gefährdungsraumes des HQ300-Ereignisses.

Feuchtgebiete

Historisch nahmen Feuchtgebiete 4,4km² und somit 1,4% des gesamten vom HQ300 gefährdeten Raumes ein. Heute wird nur mehr ein Fünftel der ursprünglichen Feuchtgebietsfläche durch diese Klasse abgebildet und repräsentiert mit knapp 0,9km² nur mehr 0,4% des Überflutungsraumes. Waren historisch 62% aller im EZG liegenden Feuchtgebietsflächen vom HQ300-Ereignis betroffen, so sind es heute 92%.

Grünland

Mit 54% aller überfluteten Flächen bildet das Grünland heute den maßgeblichen Teil des HQ300-Überflutungsraumes ab. Historisch bildete das Grünland mit 37% noch weniger als die Hälfte aller überfluteten Räume ab. In absoluten Einheiten ausgedrückt, beträgt das vom HQ300 betroffene Grünland historisch 115km² und heute 132km². Der Anteil des überfluteten Grünlandes am gesamten im EZG vorhandenen Grünland beträgt heute mit 13% gut einen Prozent mehr als historisch.

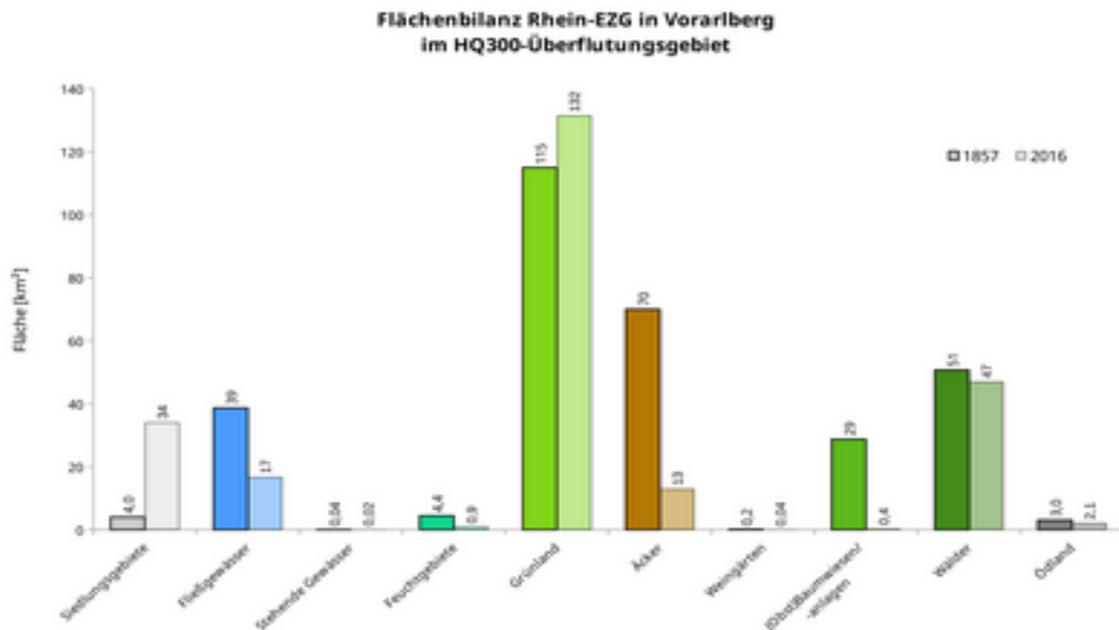


Abbildung 6.18: Flächenbilanz des HQ300-Raumes um 1857 und aktuell (2016) in km²

Äcker

Im Überflutungsraum von HQ300-Ereignissen liegen historisch 70km² Äcker und heute mit 13km² nur mehr knapp ein Fünftel davon. War historisch mit 22% aller überfluteter Flächen die Klasse Äcker nach dem Grünland am stärksten von HQ300-Ereignissen betroffen, so sind die Äcker heute nur mehr mit 5% am gesamten Überflutungsgebiet beteiligt.

Weingärten

Waren historisch 6% aller Weingärten von Hochwasserereignissen der modellierten Größe betroffen, so sind dies heute 52% aller im EZG ermittelten Weingärten. Absolut betrachtet liegen historisch 15ha und heute 3,5ha innerhalb des Überflutungsraumes. In Anteilen am gesamten Überflutungsgebiet ausgedrückt machen die Weingärten in dieser Betrachtungsweise historisch wie aktuell nicht einmal ein Promille aus.

(Obst)Baumwiesen – Obstanlagen

Historisch befanden sich 29km² der (Obst)Baumwiesen innerhalb des HQ300-Gebietes. Damals bildete diese Klasse 9% aller überfluteten Flächen ab. Heute sind es mit 36ha nur mehr rund 1%

des ursprünglichen Ausmaßes. Dies ist auf die methodische Problematik zurückzuführen (vgl. Kap. 5.1 & 7.1). Im Verhältnis zu allen im EZG ermittelten (Obst)Baumwiesen und Obstanlagen machen die im Falle eines HQ300-Ereignisses überfluteten Flächen historisch ein Zehntel, heute jedoch nahezu zwei Drittel aus.

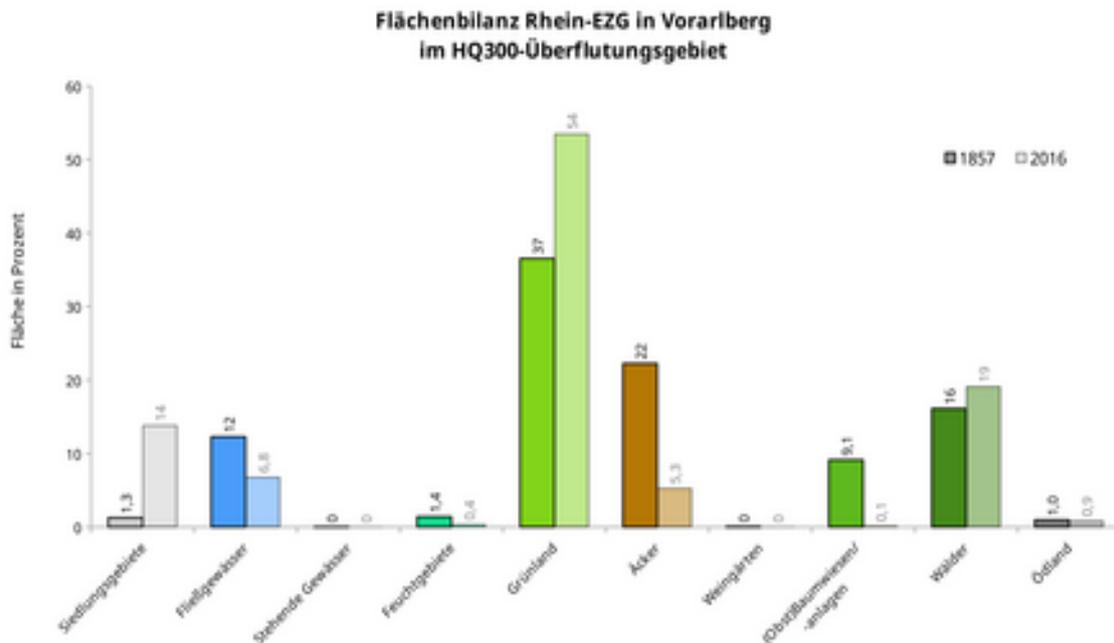


Abbildung 6.19: Prozentueller Anteil der jeweiligen Landbedeckungskategorie am HQ300-Raum 1857 (dunkel) und 2016 (hell)

Wälder

Historisch machte die Klasse der Wälder 16% aller überfluteter Flächen aus. Heute ist dieser Prozentanteil stärker ausgeprägt und beträgt 19%. In absoluten Zahlen waren historisch 51km² und heute 47km² innerhalb des HQ300 geprägten Raumes Wald. Im Verhältnis zu der Fläche der Wälder im gesamten Einzugsgebiet beträgt der von Überflutungen betroffene Teil historisch 8% und heute 5%.

Ödland

Das Ödland bildet historisch sowie aktuell das HQ300-Gebiet zu einem Prozent ab. Waren es historisch 3km², so sind dies heute 2,1km² bzw. historisch 1,3% und heute 1% aller im Untersuchungsgebiet ermittelter Ödlandflächen.

Gletscher

Diese Klasse ist historisch sowie aktuell nicht im modellierten Gefährdungsbereich eines HQ300-Ereignisses.

6.4.2 Transformation im HQ300-Überflutungsraum

Wie vorangehend für das gesamte Einzugsgebiet des vorarlbergischen Rheins beschrieben (vgl. Kap. 6.3), wird auch für die im Falle eines HQ300-Ereignisses überfluteten Flächen eine Transformationsanalyse durchgeführt. Dabei kann die Flächentreue der einzelnen Klassen ermittelt und aufgezeigt werden, inwiefern die jeweilige Klasse gleich der historischen Landbedeckung auftritt (vgl. Abb. 6.20). Zudem werden in diesem Verschneidungsschritt verdrängende bzw. verändernde Klassen auffällig – es sind dies Landbedeckungsklassen, welche historische Landbedeckung ablösen und aktuell anstelle historischer Klassen auftreten (vgl. Abb. 6.21).

Wichtig ist hierbei anzumerken, dass die Ausdehnung des historischen sowie aktuellen HQ300-Überflutungsraumes voneinander abweicht bzw. wie weiter oben erläutert, aktuell eine um 22% (69km²) geringere Ausdehnung als historisch aufweist. Im nachgereihten Kapitel werden die Betrachtungen auf die aktuell neu hinzugekommenen (HQ-Plus) sowie die ausschließlich historischen Überflutungsräume, die heute nicht mehr existieren (HQ-Defizit), näher dargelegt (genaueres dazu in Kap. 6.4.3). Die Erkenntnisse der Transformationsanalyse werden in diesem Abschnitt für die Landbedeckungsklassen innerhalb des historischen HQ300-Raumes fokussiert.

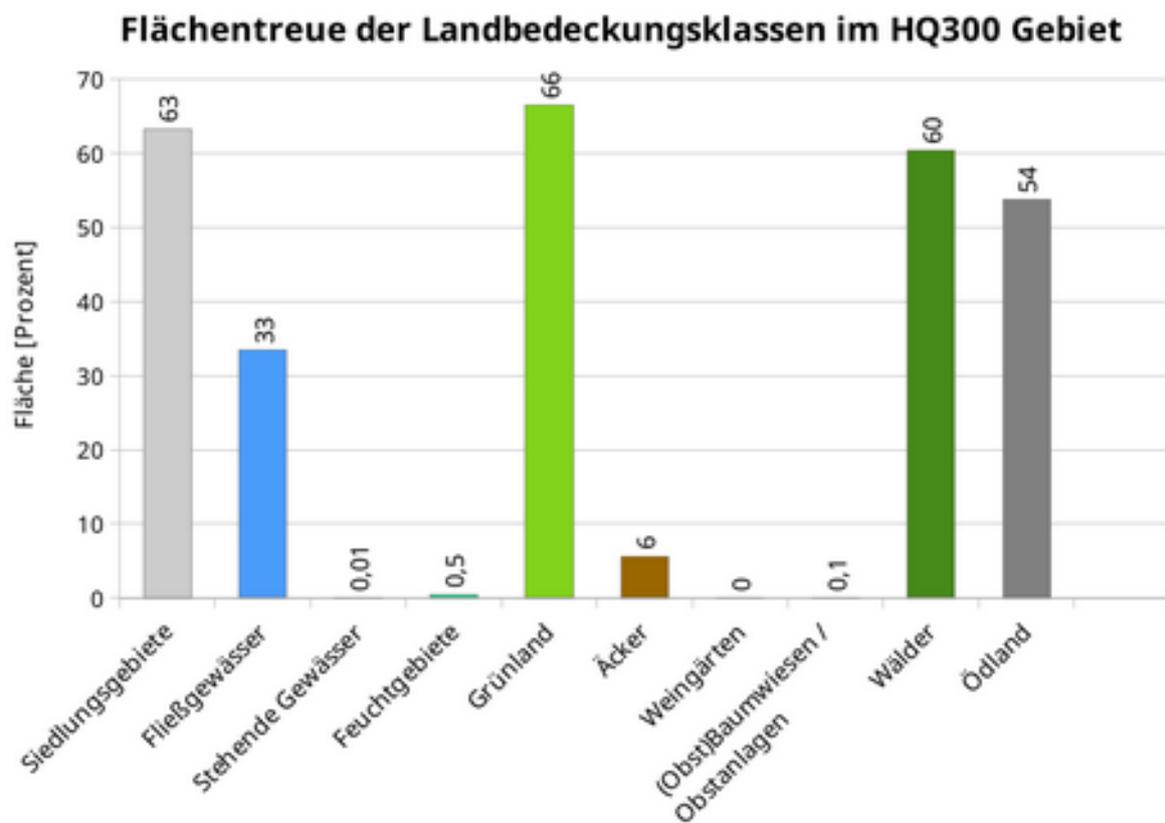


Abbildung 6.20: Flächentreue der Landbedeckungsklassen im HQ300-Gebiet – Prozentuelle Darstellung - Die Klassen Siedlungsgebiet, Grünland, Wald und Ödland bedecken heute über 50% jener Flächen, für welche bereits 1857 die entsprechende Landbedeckungsklasse im HQ300-Überflutungsraum eruiert wurde.

Siedlungsgebiet

Die knapp 3km² historisch im HQ300-Überflutungsraum liegenden Siedlungsgebiete sind zu 63% (1,8km²) konstant geblieben und zu einem Drittel (92ha) Grünland. In geringerem Maße sind historische Siedlungsgebiete heute Wäldern (2,6%) und Fließgewässern (1%) zuzuordnen.

Fließgewässer

Genau ein Drittel, nämlich 10,3km² der sich historisch im HQ300-Überflutungsraum befindenden Fließgewässer (30,7km²) ist konstant geblieben. Die Umformung erfolgt insbesondere in Wälder 28% (8,6km²), Grünland 26% (8km²) und Siedlungsgebiete 8% (2,3km²). 93ha sind heute Äcker, 24ha Ödland und 14ha Feuchtgebiete.

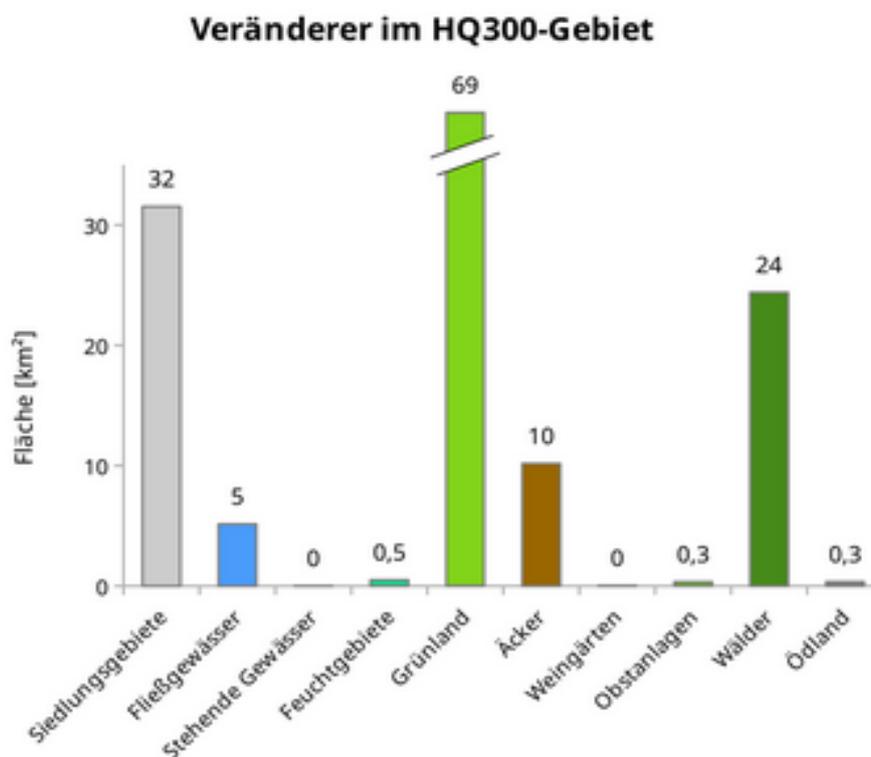


Abbildung 6.21: Landbedeckungsklassen welche historisch vertretene Landbedeckungen im HQ300-Gebiet ablösen. Darstellung mittels absoluter Werte (km²). Grünland, Siedlungsgebiet und Wälder klar als verdrängende Landbedeckungsklasse im HQ300-Gebiet erkenntlich.

Feuchtgebiete

Die historischen Feuchtgebiete (3,7km²) sind fast vollständig (99,5%) transformiert worden, lediglich 2ha sind aktuell noch Feuchtgebiete. Hauptsächlicher Verdränger war mit 68% (2,5km²) das Grünland und weiters waren zu 12% (46ha) die Siedlungsgebiete und 11% (41ha) die Äcker an der Umwandlung beteiligt. 4ha sind heute Fließgewässer, 3ha Weingärten.

Grünland

Nahezu ein Drittel (29%) aller historisch von HQ300-Ereignissen erfasster Flächen war Grünland (92km²) und somit die Klasse mit der stärksten Vertretung innerhalb des historischen Hochwasserabflussraumes. Von den historischen Grünlandflächen sind zwei Drittel (61km²) dies auch heute noch. Die restlichen historischen Grünlandflächen sind heute zu 13% Siedlungsgebiete, 9% Wälder, 8% Äcker und 2% Fließgewässer und rund 0,4% bzw. 35ha Feuchtgebiete. Die restlichen 31ha teilen sich heute Obstanlagen und Ödland.

Äcker

Von den historischen rund 50km², welche vom HQ300 betroffen waren, sind heute 73% (36km²) Grünland und 18% (9km²) Siedlungsgebiet. Die nach wie vor der Klasse Äcker zugeordneten Flächen machen 5,6% bzw. 2,8km² aus. 3,5% (1,7km²) historisch vom HQ300-Ereignis erfasste Äcker sind heute Wald.

(Obst)Baumwiesen - Obstanlagen

Historisch lagen 22km² (Obst)Baumwiesen im HQ300 Überflutungsgebiet. Diese Flächen sind heute fast vollständig andersartige Landbedeckung. Mehr als die Hälfte ist heute Grünland (12km²) und jeweils ein gutes Fünftel Wälder und Siedlungsgebiete. 2% (45ha) sind heute Fließgewässer und 1% (23ha) sind heute Äcker. Auf den historischen (Obst)Baumwiesen sind heute noch 2ha Obstanlagen. Die Interpretation der Ergebnisse ist auch hier aufgrund methodischer Problematik schwierig gestaltet (vgl. Kap. 5.1 & 7.1).

Wälder

Historische Wälder (38km²) im HQ300-Überflutungsraum sind zu fast zwei Drittel (23km²) konstant mit derselben Landbedeckung belegt. 23% (9km²) sind aktuell Grünland, jeweils 7% Siedlungsgebiete (2,6km²) und Fließgewässer (2,5km²) sowie 2% (0,9km²) Äcker.

Ödland

Historisch waren 2,7km² Ödland von einem HQ300-Ereignis betroffen. Die Hälfte davon ist konstant in der Landbedeckung (1,4km²) geblieben. Grünland (56ha), Wälder (30ha), Siedlungsgebiete (24ha) und Fließgewässer mit (12ha) sind weitere Treiber der Transformation des Ödlandes.

6.4.3 Veränderung des HQ300-Überflutungsraumes

Der historische HQ300-Überflutungsraum wurde wie in Kap. 4.3 erläutert auf der Basis des aktuellen HQ300-Überflutungsraumes mithilfe des Geländemodells sowie bekannter Baumaßnahmen von Severin Hohensinner näherungsweise rekonstruiert. Eine grafische Veranschaulichung dieser Entwicklung mit Ausschnitten aus Hochgebirge und Tiefland sind in Abb. 6.22 und Abb. 6.23 ersichtlich.

Verschwundene HQ300-Flächen (HQ300-Defizit)

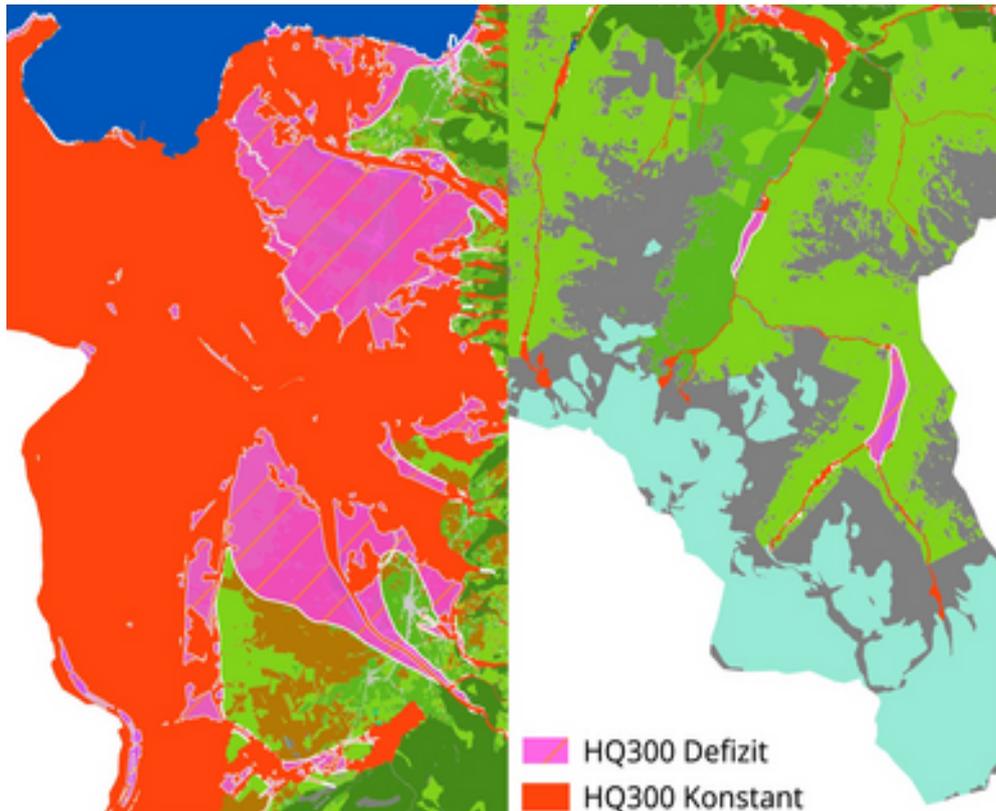


Abbildung 6.22: Das 1857 wie 2016 konstant vom HQ300-Ereignis überflutete Gebiete (rot) sowie das HQ300-Defizit, d.h. der heute nicht mehr überflutete, jedoch historisch von HQ300-Ereignissen beeinflusste Raum (pink) Landbedeckung 1857 im Hintergrund - Ausschnitt Rheintal (links) - Ausschnitt Silvretta (rechts)

In diesem Abschnitt wird eine Bilanz der heute nicht mehr überfluteten, jedoch historisch von HQ300-Ereignissen beeinflussten Räumen eingegangen. Dies entspricht knapp einem Viertel (rund 23%) und somit 73km² des historischen Überflutungsraumes (315km²).

Die historische Zusammensetzung der Landbedeckung in diesem Raum kann wie folgt gelistet werden: 32% Grünland, 28% Äcker, 20% Wälder, 9% (Obst)Baumwiesen, 8% Fließgewässer, 1,6% Siedlungsgebiete, 1% Feuchtgebiete und 0,5% Ödland.

Heute weist dieser Raum zu 42% Grünland, 26% Siedlungsgebiet, 15% Wälder, 11% Äcker und 6% stehende Gewässer auf.

Hinzugekommenes Überflutungsgebiet (HQ300-Plus)

Zwar ist die Summe aller von HQ300-Ereignissen betroffenen Überflutungsräume über die Zeit um 69km² zurückgegangen, dennoch sind einige Flächen heute neu im HQ300-Gefährdungsbereich hinzugekommen. Diese wurden somit in der Transformationsanalyse weiter oben nicht berücksichtigt.

1,8% des aktuellen HQ300 Überflutungsgebietes (246km²) sind seit 1857 neu hinzugekommen. Dies entspricht 4,5km² des gesamten aktuell vom HQ300-Ereignis betroffenen Überflutungsraumes.

Diese Fläche setzte sich historisch zu 85% aus stehenden Gewässern, 7,5% Gletschern, 3,1% Grünland, 1,9% Wäldern und 1,2% Ödland zusammen.

Heute ist der Landbedeckungsmix in diesem Raum wie folgt zusammengesetzt: 43% Grünland, 19% Fließgewässer, 17% Siedlungsgebiete, 8,3% Feuchtgebiete, 7,5% Ödland und 4,9% Wälder.

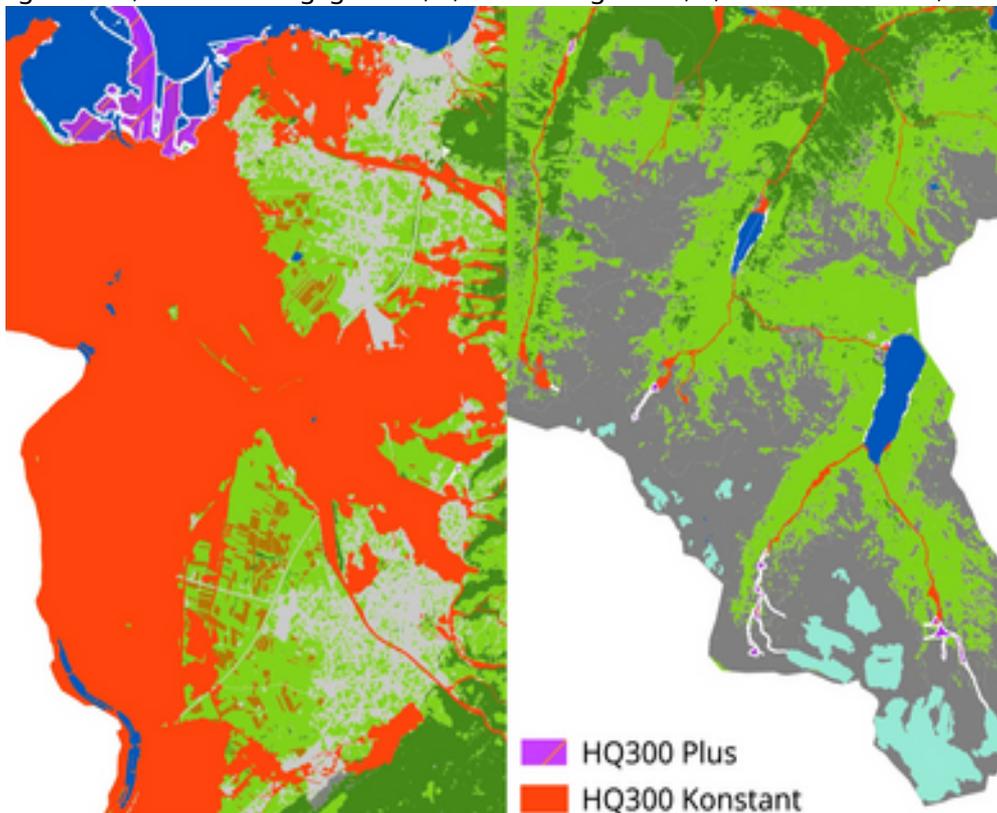


Abbildung 6.23: Das 1857 wie 2016 konstant vom HQ300-Ereignis überflutete Gebiete (rot) sowie das HQ300-Plus, d.h. die seit 1857 hinzugekommenen HQ300-Gebiete (violett). Landbedeckung 2016 im Hintergrund - Ausschnitt Rheintal (links) – Ausschnitt Silvretta (rechts)

Dieses insbesondere im Mündungsbereich des Alpenrhein am Bodensee anzusiedelnde Plus an HQ300-Überflutungsraum wird im folgenden Kap. 6.4.4 näher durch eine Verschneidung mit der historischen Bodenseefläche beleuchtet.

6.4.4 Bedeutung der Rheinregulierung für den HQ300-Überflutungsraum

Aufgrund der Tatsache, dass nur wenige Jahrzehnte nach der Erstellung des Franziszeischen Katasters durch die Rheinregulierung im Mündungsbereich des Alpenrheins eine großräumige Umgestaltung stattgefunden hat, wird hier eine kurze Statistik für die stehenden Gewässer und insbesondere die veränderte Ausdehnung des Bodensees eingegangen (Übersicht vgl. Abb. 6.24). Diese Daten geben gleichwohl Auskunft über einen Großteil der im aktuellen HQ300-Raum neu hinzugekommenen Flächen.

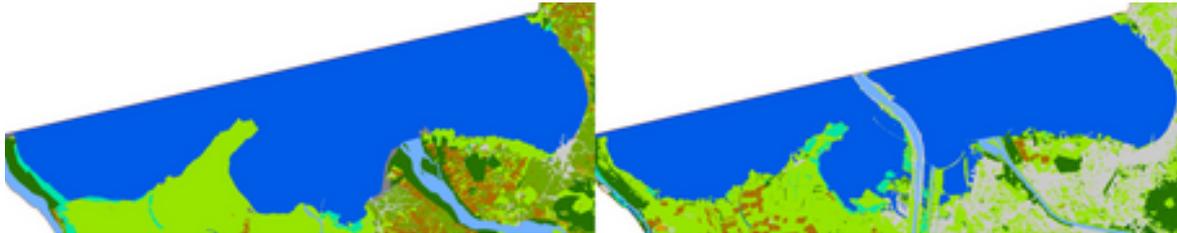


Abbildung 6.24: Bodenseeufer 1857 (links) und 2016 (rechts)

Die Gesamtfläche des Bodensees im Untersuchungsgebiet ist von historischen 35,5km² auf aktuell 32km² zurückgegangen. In Prozent ausgedrückt stellt die Wasserfläche des Bodensees historisch 95% und heute 79% aller stehenden Gewässer im jeweiligen Datensatz dar.

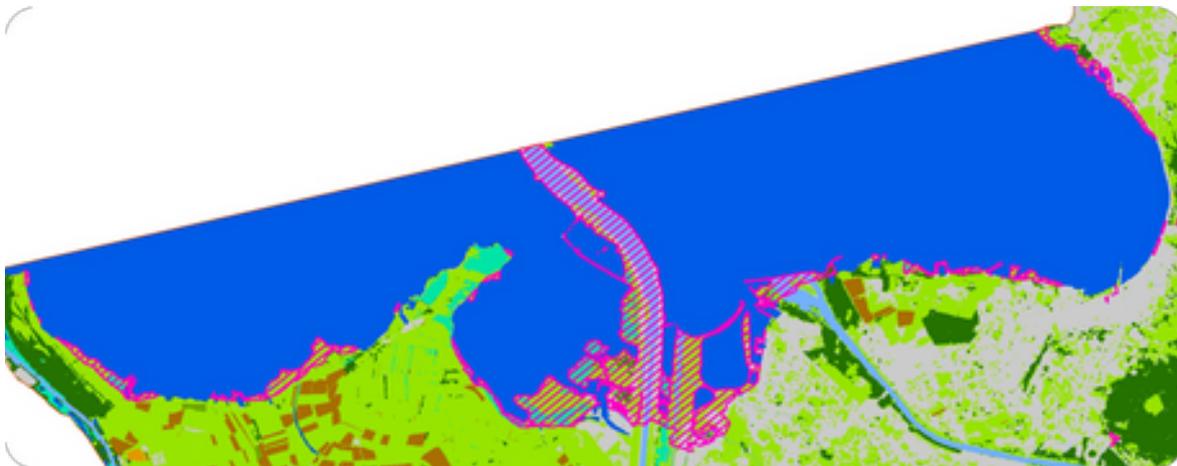


Abbildung 6.25: 1857 als stehendes Gewässer erfasste Flächen am Bodenseeufer, welche eine Landbedeckungsänderung erfahren haben und heute im Einflussbereich eines HQ300-Ereignisses stehen (rosa schraffiert)

Grenzen wir unseren Fokus weiter ein auf die ehemalige Bodenseefläche, welche heute als Landfläche im Überschwemmungsgebiet bei HQ300 liegt. Hier kommen wir auf eine Gesamtfläche von 3,7km² an ehemaliger Bodenseefläche, welche heute vom HQ300 gefährdet wird (vgl. Abb. 6.25). Dies entspricht 12% der gesamten historischen Fläche des Bodensees innerhalb des Untersuchungsgebietes. Die Zusammensetzung der Landbedeckung ist dort heute zu 45% Grünland (165ha), 22,5% Fließgewässer (83ha), 19% Siedlungsgebiet (70ha), 10% Feuchtgebiete (37ha) und knapp 4% Wälder (14ha).

Die Fläche der stehenden Gewässer über das gesamte EZG betrachtet ist insbesondere am Bodensee zurückgegangen, während die Zunahmen in dieser Klasse durch Anlage von Speicherseen entlang der Energieverwertungskette der Illkraftwerke stattgefunden hat (vgl. Abb. 6.23).

6.4.5 Höhengauswertungen des Überflutungsraumes

Die Landbedeckungsdaten im HQ300-Raum werden im folgenden Schritt mit einem Fokus auf die Veränderung nach Höhenstufe betrachtet. Dazu wird der historische sowie der aktuelle Überflutungsdatensatz (HQ-1857 und HQ-2016 vgl. Kap. 5.3) anhand des DGM in 500m Höhenstufen ähnlich zu der Betrachtung nach Höhenstufen in Kap. 6.2.1 zugeschnitten. Aufgrund der verschiedenen HQ300-Flächen (vgl. Kap. 6.4.3) wird hier nur auf die prozentuelle Klassenvertretung in der jeweiligen Höhenstufe eingegangen (vgl. Abb. 6.27 und Abb. 6.28). Eine Übersicht bietet Abb. 6.26

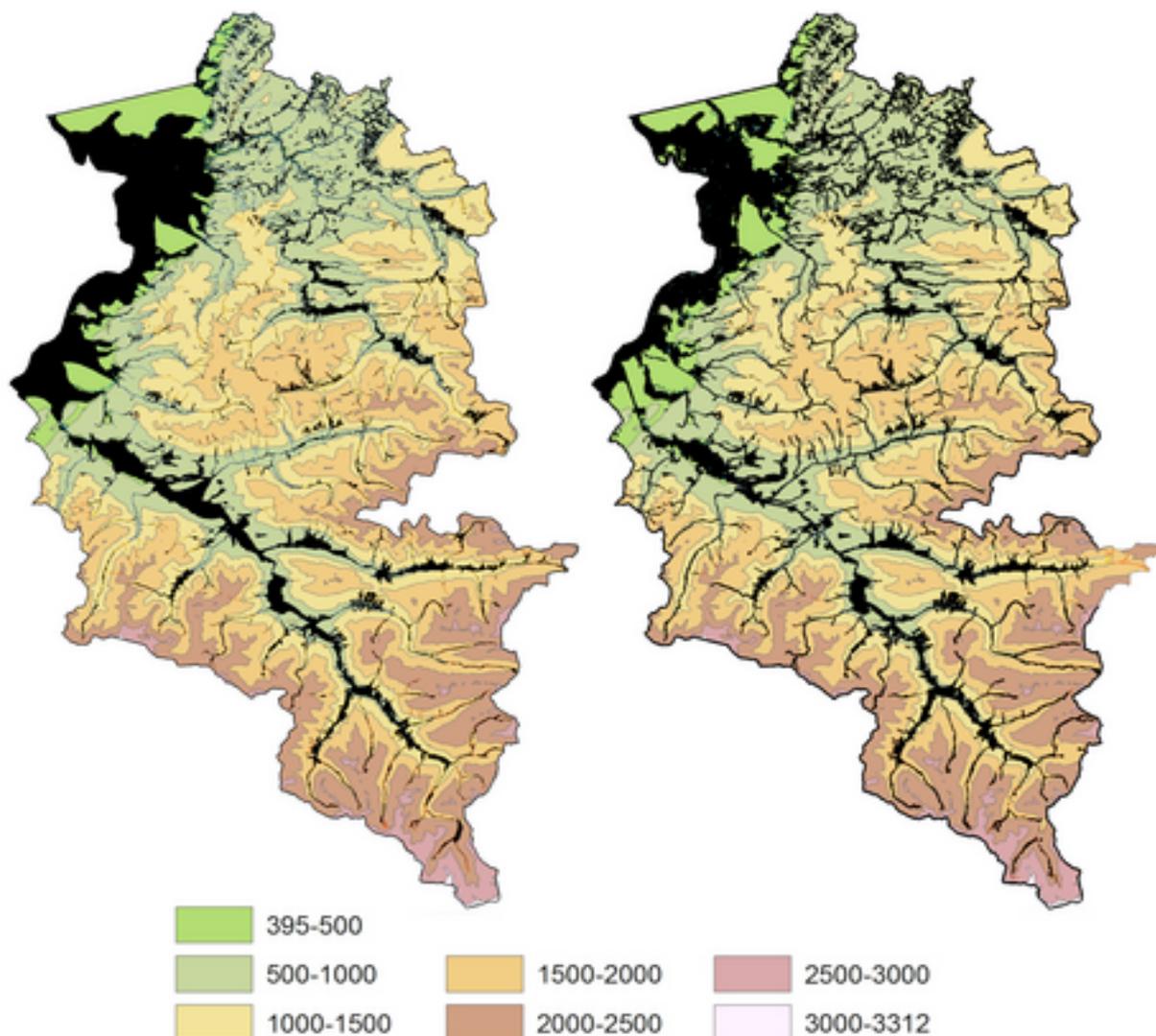


Abbildung 6.26: Dunkel hervorgehobener HQ300-Überflutungsraum 1857 (links) und 2016 (rechts) - Hintergrund Höhenstufen in 500m Schritten: 3 Stufen unterhalb 1500m, 2 Stufen zwischen 1500 und 2500m und 2 Stufen über 2500m

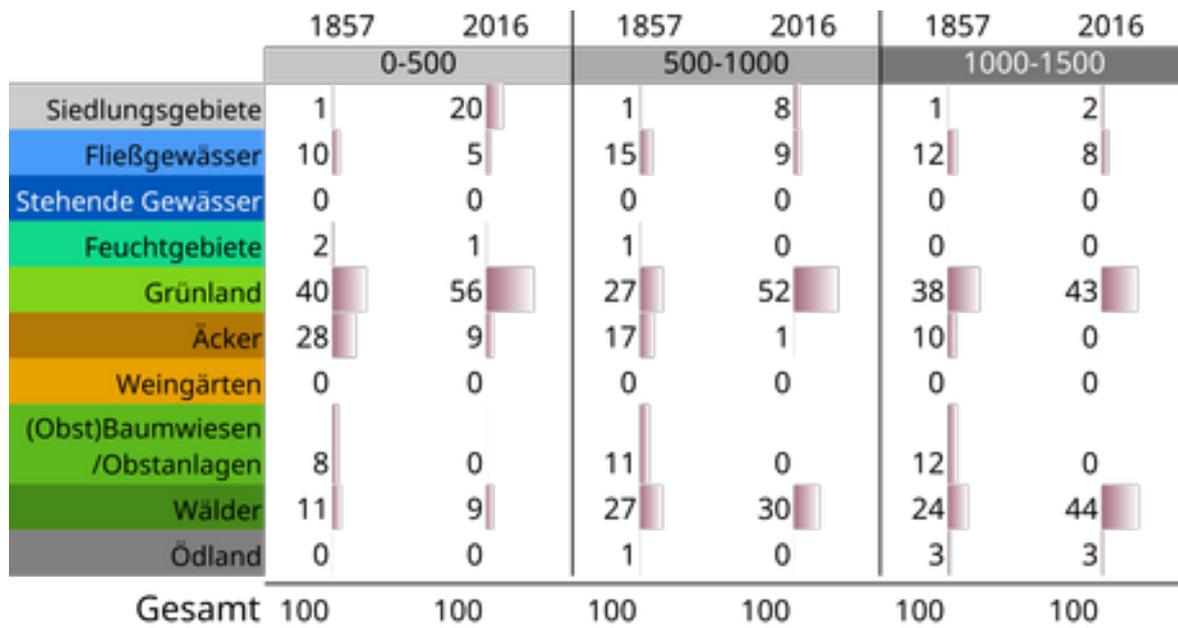


Abbildung 6.27: Überflutungsraum nach Höhenstufen 0-1500m ü. Adria - Prozentuelle Anteile am Überflutungsraum je Höhenstufe - 1857/2016

Die historisch wie aktuell am stärksten im HQ300-Raum vertretene Klasse Grünland erfuhr einen Zuwachs insbesondere in den unteren Höhenstufen, während zwischen 1500 und 2000m ein Rückgang zu verzeichnen bzw. über 2000m der prozentuelle Anteil von Grünland am HQ300-Raum konstant geblieben ist (vgl. Abb. 6.27 und Abb. 6.28).

Die Äcker spielten historisch bis 1500m eine Rolle im HQ300-Raum. Sie sind im gesamten HQ300-Gebiet von 22% auf 5% zurückgegangen und sind aktuell nur mehr bis 500m nennenswert mit 9% repräsentiert. Die Wälder erfuhren einen Rückgang bis 500m ü. Adria, während insbesondere zwischen 1000m und 2000m im HQ300-Gebiet eine Zunahme zu verzeichnen ist. Aktuell ist ein Verschwinden der Klasse über alle Höhenstufen festzustellen. Wie in vorhergehenden Analysen ist auch hier aufgrund der methodischen Problematik die Klasse (Obst)Baumwiesen nicht mit der heutigen Klasse Obstanlagen vergleichbar, daher wird nur in Verbindung mit den Wäldern auf diese Werte eingegangen. Betrachten wir die Klasse somit für das gesamte EZG gemeinsam mit den Wäldern als bestockte Flächen mit undifferenziertem Bestockungsgrad, so kann von einer maßgeblichen Abnahme der generell bestockten Flächen bis 1000m Höhe gesprochen werden, während zwischen 1000 und 2000m in ebensolchem Maße eine Zunahme zu verzeichnen ist. Zwischen 2000 und 2500m sind bestockte Flächen von 3 auf 2% zurückgegangen. In weiterer Folge kann für die Fließgewässer eine Bedeutungsabnahme im HQ300-Raum bis 1500m Höhe festgestellt werde. In der Höhenstufe zwischen 1500 und 2000m ist hingegen ein leichter Zuwachs von 1% festzustellen. Insbesondere über 2000m und unter 500m kam es zu einem Rückgang des Flächenanteils auf ein Fünftel bzw. die Hälfte des historischen Wertes. Der Abweichende Trend in der Höhenstufe zwischen 1500 und 2000müA könnte durch die generellen Datenunsicherheiten bezüglich der historischen Verortung von Fließgewässern im Gebirgsraum zustande gekommen sein (vgl. Kap. 5.3.1).

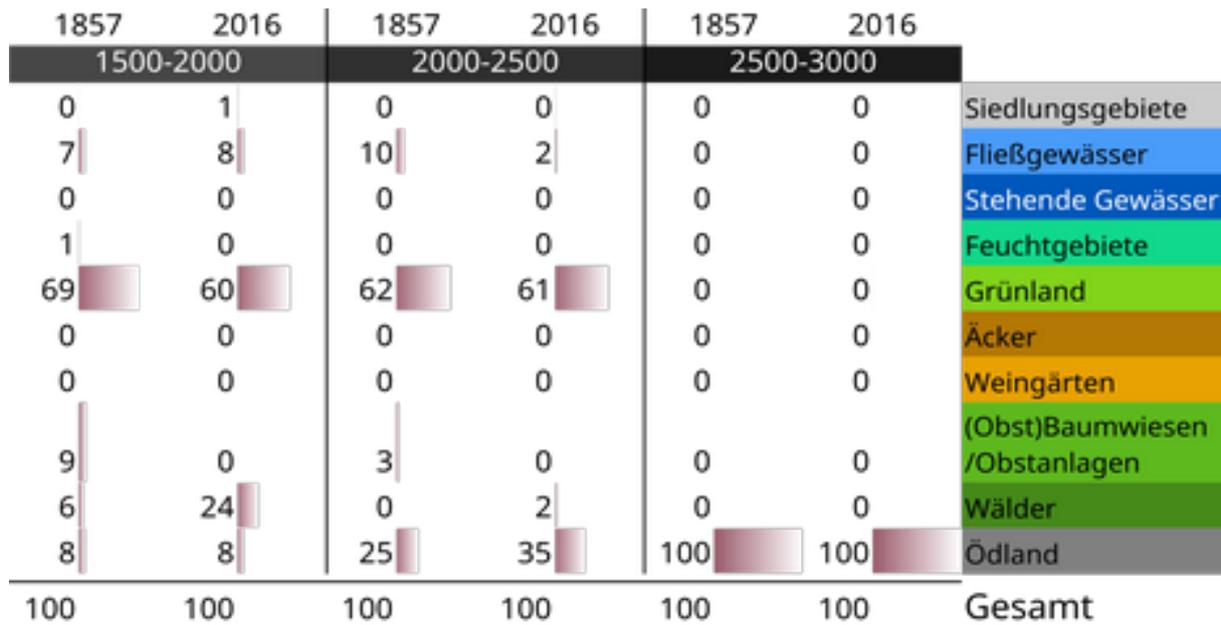


Abbildung 6.28: Überflutungsraum nach Höhenstufen 1500-3000m ü. Adria - Prozentuelle Anteile am Überflutungsraum je Höhenstufe - 1857/2016

Wie die morphologischen Betrachtungen der drei größten Fließgewässer im EZG (Kap. 3.1.1) ergeben, ist der durchwegs ausgeprägte Rückgang der Fließgewässerflächen über deren gesamten Verlauf im EZG zu beobachten. Die Speicherseen Kops-Stausee & Vermuntsee, welche zwischen den Momentaufnahmen der hier untersuchten Landbedeckungsausprägung (LB1857 & LB2016) errichtet wurden liegen beide in besagter Höhenstufe und sollten demzufolge ein weiteres ausschlaggebendes Argument gegen diesen Ausreißer darstellen.

Die Siedlungsgebiete sind im gesamten HQ300-Gebiet historisch mit 4km² und heute mit 34km² vertreten. Dieser Zuwachs betrifft insbesondere die unteren Höhenstufen – bis 500m ist ein Anstieg von 1 auf 20% des HQ-Raumes zu verzeichnen, zwischen 500 und 1000m von 1 auf 8%. Ein geringerer Anstieg, aber doch eine Verdoppelung ist zwischen 1000 und 2000m geschehen (von 1 auf 2% bzw. 0 auf 1%).

Historisch waren 4,4km² Feuchtgebiete von HQ300-Ereignissen betroffen – heute sind es noch 0,9km². Dieser Rückgang spielt sich insbesondere bis 1000m und zwischen 1500 und 2000m ab.

Sowohl historisch als auch aktuell hat die Klasse Ödland eine direkte Korrelation zwischen Höhe und Repräsentation im HQ300-Bereich. Ist sie bis 500m gar nicht vertreten, so bildet sie über 2500m 100% des HQ300-Raumes ab. Veränderungen gab es zwischen 500 und 1000m, wo eine Abnahme, während zwischen 2000 und 2500m eine Zunahme des Ödlands im HQ300-Bereich von 25 auf 35% stattgefunden hat.

Dass der Großteil der vom HQ300-Ereignissen betroffenen Räume unterhalb von 1000m Seehöhe liegt kommt in der folgenden graduellen Höhenauswertung zum Ausdruck.

Graduelle Höhengauswertung der Landbedeckungen im HQ300-Gebiet

Analog zur graduellen Höhengauswertung der Landbedeckung im gesamten Untersuchungsgebiet wurden ausgewählte Landbedeckungsklassen mit dem Digitalen Höhenmodell verschnitten. Die hierbei ermittelten Ergebnisse (Abb. 6.29) zeigen Veränderungen der mittleren Höhe im Verhältnis zum Flächenausmaß je Landbedeckung. Abbildung 6.30 gibt eine grafische Übersicht über die niedersten und höchsten Vorkommen sowie den Median der Höhe ausgewählten Landbedeckungsklassen. Die Veranschaulichung der Einflussgrößen (Obst)Baumwiesen/-anlagen und Wälder hinsichtlich der Höhen auf die aggregierte Klasse ‚bestockte Flächen‘ ist daraus ebenso zu entnehmen. Klare Trends stellen, wie in Kapitel 6.1 für das gesamte Untersuchungsgebiet erörtert, auch im HQ300-Gebiet die Zunahme des Siedlungsgebiets und des Grünlands sowie der Rückgang der Äcker und Feuchtgebiete dar.

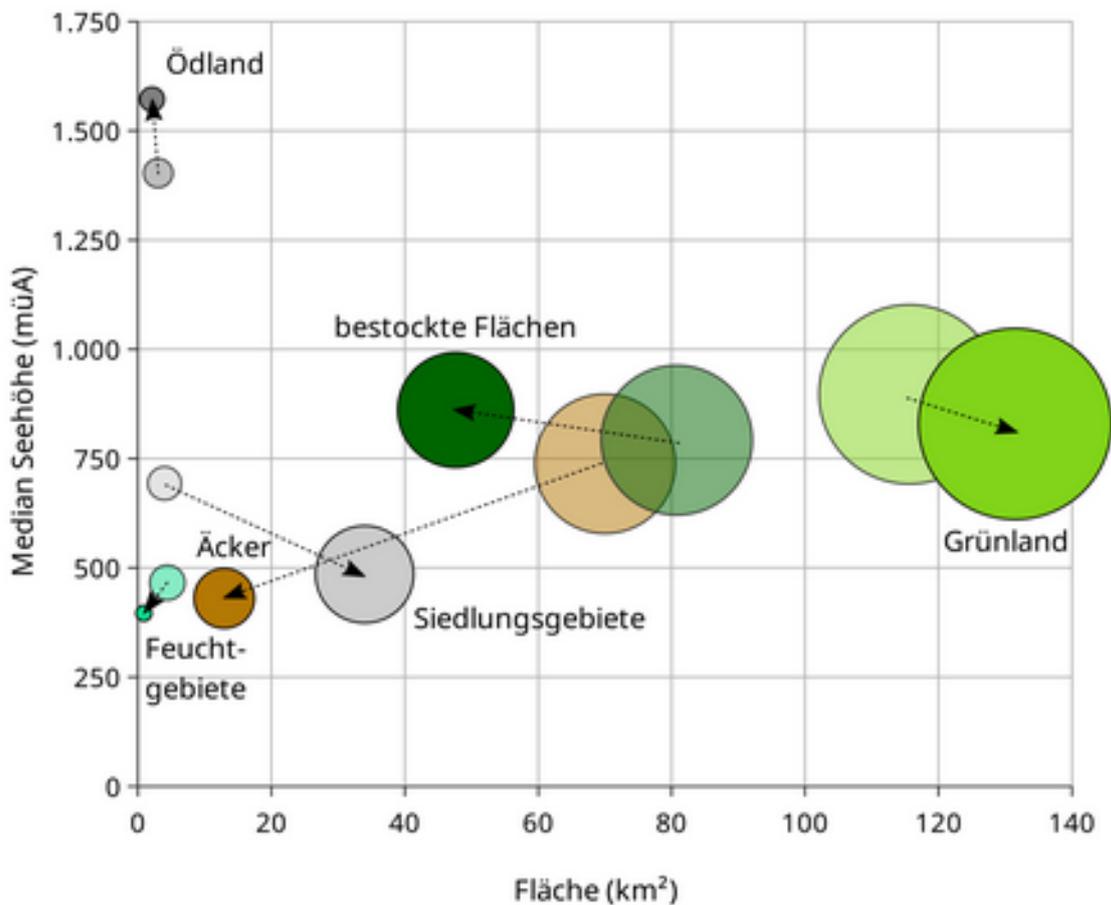


Abbildung 6.29: Höhenverschiebung (y-Achse) und Änderungen des Flächenausmaßes (x-Achse) ausgewählter Landbedeckungstypen im HQ300-Gebiet zwischen 1857 (hell) und 2016 (dunkel). Die Höhen werden durch den Median der Landbedeckungskategorie abgebildet, Kugelgrößen bilden die relative Veränderung des Flächenausmaßes der jeweiligen Landbedeckung ab. Pfeile zeigen die Entwicklung von 1857 nach 2016 auf.

Anders als der Trend der Höhenverschiebung im gesamten Untersuchungsgebiet es vermittelt, ist im HQ300-Gebiet ein deutlicher Rückgang (-41% bzw. -33km²) der bestockten Fläche festzustellen (vgl. Kap. 6.2.2). Eine weitere den Trends des Untersuchungsgebietes entgegengesetzte Entwicklung ist bezüglich der Höhenverschiebungen mit der Absenkung der mittleren Höhe des Grünlands um minus 68m von 897 auf 829m im HQ300-Raum zu erkennen. Die Änderung der mittleren Höhe entspricht bei allen anderen in Abbildung 6.30 dargestellten Landbedeckungsklassen den Trends des Untersuchungsgebietes, wobei die Intensität der Änderung bei Äckern (von 738müA auf 430müA) mit einer mehr als doppelt so starken Absenkung des Medians der Höhe (Untersuchungsgebiet: -132m – HQ300-Gebiet: -308m) durchaus stärker im HQ300-Gebiet ausfällt. Ebenso ist die Höhenverschiebung des Ödlands im HQ300-Gebiet intensiver. Der Median im HQ300-Gebiet (+169m von 1403müA auf 1572müA) ist nahezu doppelt so stark angestiegen als dies im gesamten Untersuchungsgebiet (+91m von 2144müA auf 2235müA) der Fall ist.

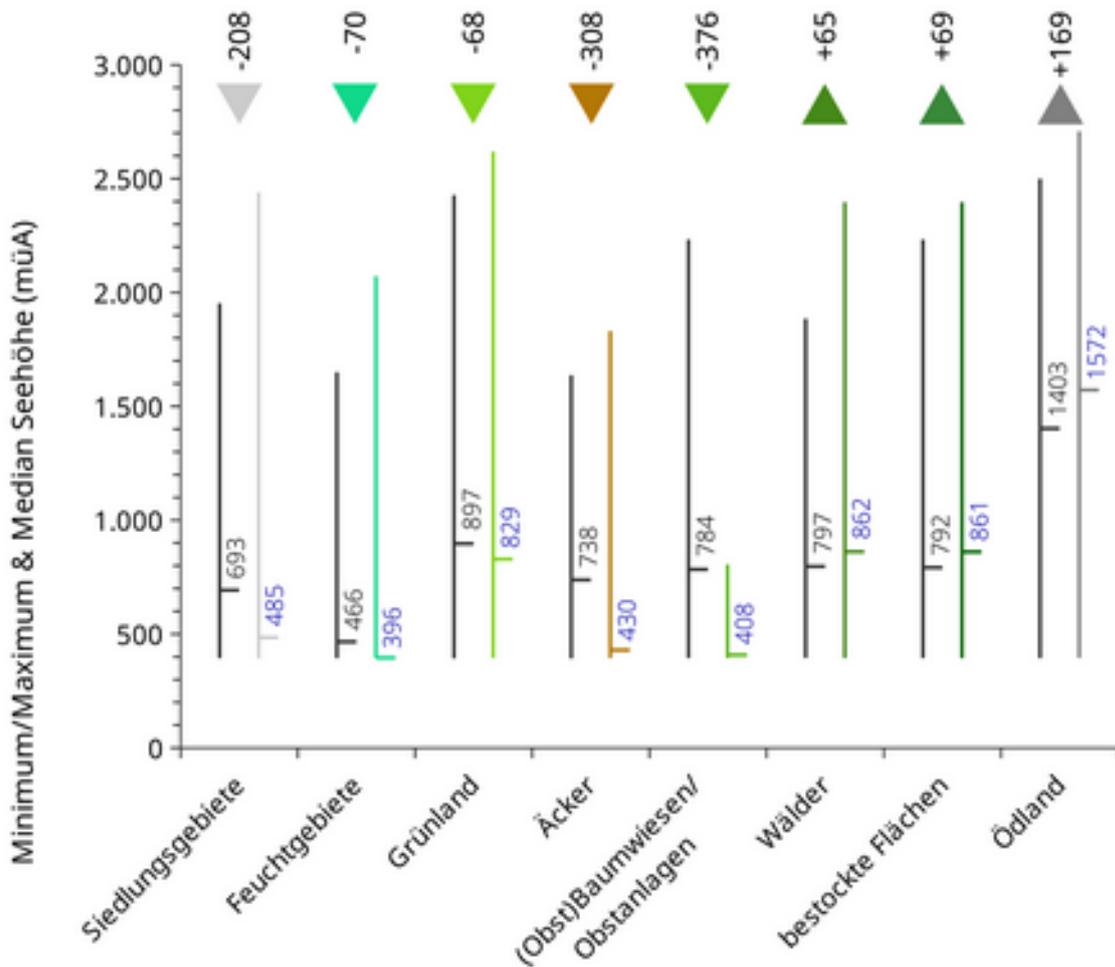


Abbildung 6.30: Gegenüberstellung des niedersten und höchsten Vorkommens sowie der mittleren Höhe (Median) ausgewählter Landbedeckungsklassen 1857 (schwarz) und 2016 (farbig). Die Zahlenreihe am oberen Ende fasst die Veränderung des Medians (in Meter) zwischen 1857 und 2016 zusammen.

Eine im Verhältnis zum Untersuchungsgebiet (-401m von 798müA auf 397müA) weit geringere Höhenverschiebung im HQ300-Gebiet (-70m von 466müA auf 396müA) ist bei den Feuchtgebieten festzustellen. In Abbildung 6.30 sind die bereits dargestellten Verschiebungen der mittleren Höhe ausgewählter Landbedeckungsklassen ersichtlich. Zusätzlich sind die niedersten und höchsten Vorkommen in den behandelten Datensätzen aufgeführt und verdeutlicht damit, dass alle dargestellten Klassen 2016 eine höhere Streuung als 1857 aufweisen und wenn teilweise auch nicht in substanziellem Ausmaß bis in höhere Regionen als historisch vorkommen. So sind wie aus Abbildung 6.28 hervorgeht 1857 sowie 2016 im HQ300-Gebiet über 2500m Seehöhe rund 100% Ödland. Die im aktuellen Datensatz in geringem Maße vorhandenen Grünlandflächen über 2500müA stellen mit 34m² weniger als 1% dieser Höhenstufe dar.

7 Diskussion der Resultate

7.1 Bemerkungen zur Datenbeschaffenheit

Der inhomogene Detaillierungsgrad des aktuellen Datensatzes bzw. die mangelnde Verfügbarkeit von einheitlichen Datensätzen, die das Beobachtungsgebiet abbilden, sowie die, in Vorarlberg durchaus gut gepflegte, jedoch über Grenzen hinweg nur in kleinen Schritten voranschreitende Open-data Kultur erschweren die GIS-basierten Datenanalysen.

Obwohl das Land Vorarlberg durchaus als Vorreiter in Sachen Bereitstellung diverser Geoinformationen gelten kann, sind die aktuellen Landbedeckungskarten, die als Datengrundlage für diese Arbeit herangezogen wurden, nur eine Annäherung an den tatsächlichen Ist-Zustand. Da diese Masterarbeit als Teil des POCO-FLOOD-Projektes erstellt wurde, wurde sie zum Zwecke der Einheitlichkeit mit denselben Datengrundlagen bearbeitet, wie sie in für alle untersuchten Gebiete (Einzugsgebiet der Salzach und der Drau) innerhalb des Alpenkonventionsraumes zur Verfügung gestellt werden können.

Einen wesentlichen Unterschied zwischen den aktuellen und den historischen Daten bildet die verschiedene Datenherkunft. Historisch erfolgte die Ausweisung der Landbedeckungsklasse pro Parzelle (d.h. einer beliebig großen Fläche). Herrscht somit historisch eine pauschale Beurteilung der Flächen nach Eigentums-/Parzellengrenzen vor, so ist die Rasterweite des LISA-Datensatzes mit 10x10m über das gesamte Beobachtungsgebiet vereinheitlicht und führt zum verpixelten Charakter des Datensatzes (Abb. 5.3).

Ein weiteres Handicap der verwendeten Datensätze ist in Ihrer Ausdehnung und Begrenzung auf das jeweilige Staatsgebiet zu finden. So ist das Digitale Geländemodell wie auch der aktuelle Landbedeckungsdatensatz nicht Deckungsgleich mit dem historischen Datensatz und somit des Untersuchungsgebietes. Wurde der aktuelle Datensatz in Grenzregionen händisch nachkorrigiert (Kap. 4.3.2), sind für die Betrachtungen der Landbedeckung nach Höhenstufen nur die mit dem Geländemodell überschneidenden Flächen herangezogen worden (Kap. 6.2.1) und somit zum gesamten Untersuchungsgebiet abweichende absolute Zahlen ermittelt worden. Der Fehler liegt maximal im zweistelligen Hektarbereich und wurde in Anbetracht des Beobachtungsmaßstabes (Kap. 5.5) hingenommen.

Die Klassen (Obst)baumwiesen/Obstanlagen (-99.8% / -280km²) und Wälder (+58% / +361km²) bilden Ausreißer in der relativen und absoluten Flächenab-/zunahme zwischen den verglichenen Landbedeckungsdaten (Abb. 6.5). Dies ist nicht nur auf einen Strukturwandel in der Landwirtschaft – der einhergehenden Auflassung der unrentableren Flächen [Bätzing 2003] [Vetter 2014], der veränderten Wertigkeit in der Ressourcennutzung nach der Elektrifizierung [Piltzner 11.2002] sowie dem klimawandelbedingten Anstieg der Temperatur – und den damit verbundenen veränderten Wuchsbedingungen zurückzuführen, sondern auch der Beschaffenheit des verwendeten Kartenmaterials geschuldet. Dementsprechend sind die Aussagen dieser Arbeit, wie in den jeweiligen Kapiteln bereits andiskutiert (z.B. Kap. 5.1 und Kap. 6.4.5), im Lichte folgender Datenbeschaffenheit bzw. Klassendefinition differenziert zu

interpretieren: Zwei grundlegend verschiedene Landbedeckungen sind in der Landnutzungs-kategorie (Obst-)baumwiesen & Obstanlagen gegenübergestellt. So fasst die historische Landbedeckung in dieser Kategorie sowohl siedlungsnahe Streuobstwiesen, locker bestockte Weiden als auch Krummholzzonen zusammen, wobei die beiden letztgenannten besonders in höhergelegenen Gebieten sehr großflächig ausgewiesen wurden (Abb. 6.2). Im aktuellen Datensatz (Tab. 1) ist die Kategorie Obstanlagen auf INVEKOS-Daten zurückzuführen und bezeichnet dementsprechend nur intensiv landwirtschaftlich genutzte Anlagen und ist daher nur in Tallagen vertreten. In der Untersuchung zur Landbedeckungsänderung im Hochgebirge und den Höhenauswertungen konnte dieser Umstand klar eruiert werden. Es sei hier auf die weiterführenden Arbeiten im Rahmen des POCO-FLOOD-Projektes verwiesen, in welchen dieser Missstand berücksichtigt wird.

Aussagen zu sehr kleinräumigen Landbedeckungsarten, wie beispielsweise den Siedlungsgebieten, welche sich historisch zum Großteil aus kleineren Weilern zusammensetzten, müssen ebenfalls mit Vorsicht genossen werden, da die Abstraktion in der Digitalisierung der historischen Daten dies nur begrenzt zulässt und somit nicht eine vollständige Erfassung derselben erfolgt ist. In gleichem Maße veranlasst die teils zurückhaltende Aggregation von aktuellen Siedlungsgebieten zu Unsicherheiten in der Datenlage. Wie in Kap. 5.2 angemerkt unterschätzt der aktuelle Datensatz im Vergleich zum historischen die tatsächlichen Ausmaße dieser Landbedeckungskategorie.

Betrachtet man die in der Landbedeckung 2016 ermittelten Feuchtgebietsflächen so sind sie 1857 zu knapp 42% Grünland, 41% stehendes Gewässer und zu 15% Fließgewässer. Nur 2% bzw. 2ha der aktuellen Feuchtgebiete weisen 1857 die selbe Landbedeckung auf. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass die Landbedeckung 2016 nicht alle Feuchtgebiete erfasst, da die Satellitenaufnahmen, Luftbildklassifizierung bzw. die automatische Auswertung nicht genau genug sind. Mit Gewissheit kann jedoch ein deutlicher Rückgang der Summe aller Feuchtgebietsflächen in des Untersuchungsgebietes anhand der ermittelten Daten festgestellt werden (von 7km² auf 1km² bzw. rund minus 87%).

Zur morphologischen Beschreibung (Kap. 3.1.1) der historischen Fließgewässer wurde im weitesten Sinne auf den Franziszeischen Kataster zurückgegriffen. Die Erfassung desselben erfolgte auf sogenannten Mappenblättern, welche für jede Katastralgemeinde erstellt wurden. Bei der Kartierung wurde den Kiesbänken in Fließgewässern nur teilweise Beachtung geschenkt, bzw. war deren Aufnahme ins Mappenblatt nur den über deren Vorgaben hinausreichenden Bemühungen und den gestalterischen Fertigkeiten der Vermessungsadjunkten und Geometer geschuldet. Dies ist an den Überlappungs-/Randzonen der einzelnen Mappenblättern der Urmappe wiederholt feststellbar, wo detaillierte Ausgestaltungen auf schematische Darstellungen treffen. Da im Zuge der Digitalisierung die Kiesbänke und Fließgewässer säumende Ödlandflächen, die offensichtlich zum aktiven Gerinne der Gewässer gehören, ohnehin der Kategorie Fließgewässer zugeordnet wurden, stellt dies für die Flächenbilanz kein Problem dar. Die morphologische Beschreibung (Kap. 3.1.1) ist jedoch aufgrund dieser Tatsache anhand des Franziszeischen Katasters nur bedingt möglich. Eine weitere Datenunschärfe bildete historisch wie auch aktuell der Umstand, dass der Verlauf der Fließgewässer Verwaltungsgrenzen abbildet. Im

zugrundeliegenden georeferenzierten Datensatz "Urmappe" wurden diese teils inkongruenten Grenzabbildungen benachbarter Kartenblätter weitgehend minimiert, jedoch sind Fließgewässerbreiten in diesem Lichte mit Vorsicht zu betrachten.

Die Unschärfe des Franziszeischen Katasters im Hochgebirge konnte mittels der annähernd zeitgleich, jedoch weitaus großmaßstäblicher (1:28.800), verfassten Zweiten Landesaufnahme nicht zufriedenstellend ausgebessert werden, was für die Landbedeckungsklasse Ödland weitere Abstraktionsschritte notwendig machte (Kap. 4.1). Der erfolgte Import der aktuellen Ödlandflächen in den historischen GIS-Datensatz, um solche kleinere, historisch nicht kartierten Flächen zu ergänzen, birgt ebenfalls methodische Unsicherheiten in sich.

7.2 Veränderungen der Landbedeckung im österreichischen Rhein-Einzugsgebiet (vgl. Forschungsfrage i)

Die errechneten Flächenbilanzen (vgl. Kap. 6.1 und 6.2) stellen Momentaufnahmen dar, die 160 Jahre voneinander getrennt, nicht absolut kausal miteinander verknüpft werden können (vgl. Kap. 6.3). So haben natürliche Prozesse und menschliches Zutun die Landbedeckung kontinuierlich, nicht wie in der Gegenüberstellung oft suggeriert direkt, zum aktuellen Zustand geführt. Die in der Folge beschriebene Dynamik, welche Flächen heute früher andere Flächen waren, können nicht als 1:1-Übertragungen derselben Flächen gesehen werden. Sie können dennoch eine Tendenz der unterschiedlichen Landbedeckung bzw. die Veränderung derselben aufzeigen.

Gemessen am historischen Zustand des Untersuchungsgebietes ist die Spur des Menschen am offensichtlichsten an der bebauten Fläche bzw. dem Siedlungsgebiet abzulesen. Neunmal soviel Siedlungsfläche kennzeichnen den aktuellen Zustand. Hier bleibt zu beachten, dass die Siedlungsgebiete in den aktuellen Daten genauer dargestellt sind, als dies in der Digitalisierung des Franziszeischen Katasters möglich war. Hier wurden nur größere Weiler als Siedlungsraum digitalisiert, wodurch auch hier eine gewisse Ungenauigkeit mitgedacht werden muss. Dennoch ist eine Verneunfachung der Siedlungsfläche im Untersuchungsgebiet, das sehr stark durch geomorphologisch unbebaubare Flächen (große Berggebiete = Ödland) gekennzeichnet ist, als immens einzuschätzen. Nur 3,5% des untersuchten Raumes ist heute der Klasse Siedlungsgebiet zuzuordnen. 41% dieser Siedlungsgebiete sind aktuell im HQ300-Abflussbereich. Der HQ300-Raum von Bodenseeniveau bis 500m ü. Adria besteht zu 20% und zwischen 500 und 1000müA zu 8% aus Siedlungsgebieten. Die Absenkung der mittleren Höhe um 217m auf 588müA ist als Indiz für den geomorphologisch geleiteten Siedlungsbau in den flachen Tallagen zu erkennen (vgl. Kap. 6.2.2 und Kap. 6.4.5).

Eine erhebliche Zunahme mit einem Plus von 58% bzw. 361km² im gesamten Einzugsgebiet erfuhr die Klasse der Wälder. Diese extreme Ausformung ist sicher auch dem zuvor bereits diskutierten Umstand der Klasse (Obst)Baumwiesen geschuldet, welche im aktuellen Datensatz anders definiert ist als historisch (vgl. Kap. 7.1). Kombiniert man folglich (Obst)Baumwiesen/Obstanlagen und Wälder als Flächen mit undifferenziertem Bestockungsgrad ist ein Anstieg der mittleren Höhe um 92m auf 1253müA mit leichtem Wachstum von rund 14km² (+2%) unterhalb 1500m und starkem Zuwachs (+35% bzw. 66km²) zwischen 1500 und 2500m zu bemerken (vgl. Kap. 6.2).

Das Grünland ist ein weiterer Gewinner aus dem Vergleich der Landbedeckungen, wobei sich die Zugewinne aus ehemaligen (Obst)baumwiesen (130km²), Äckern (105km²), Wäldern (58km²) und Ödland (33km²) erschließen (vgl. Kap. 6.3). Bezogen auf verschiedene Höhenstufen sind die merklichsten Zuwächse des Grünlands unterhalb von 1500m zu verzeichnen mit einem Plus von 66km² (+13%) und einer Abnahme zwischen 1500-2500m um 20km² (vgl. Kap. 6.2).

Hier könnte ein Zusammenhang mit der Abnahme der Bestoßung (Verhältnis Vieh zu Weidefläche) schwer erreichbarer Weiden bzw. Aufgabe von Bergmähdern zwischen 1500 und 2500m Seehöhe und somit der Extensivierung der agrarischen Nutzung in den Berggebieten vermutet werden, während die Umwandlung vieler Äcker in Grünland unterhalb von 1500m durch die andernorts leichtere Bearbeitbarkeit der Böden mit großen landwirtschaftlichen Maschinen erklärt werden könnte.

Die Fließgewässer nehmen heute relativ zum historischen Flächenausmaß dieser Landbedeckung 39km² nur mehr rund 43% (17km²) ein (vgl. Kap. 6.1). Der Rückgang der Fließgewässerfläche ist mit den erfolgten Regulierungen, Begradigungen und Abdämmungen sowie den großräumigen Aufstauungen von Stauseen im Hochgebirge zu begründen, welche die ehemals verzweigten, mäandernden und ursprünglich Talsohlen umspannenden Flussläufe durch stehende Gewässer ersetzt haben (vgl. Kap. 3.1.1 und Abb. 7.1).



Abbildung 7.1: Wie im Franziszeischen Kataster ersichtlich flankierten historisch weitläufige Schotterbänke sowohl den Rhein bei der Frutmündung (oben) als auch die Bregenzer Ache bei Rieden (unten) – Die Gegenüberstellung des aktuellen Datensatzes (rechts) und der historischen Landbedeckung (mitte) bezeugt die aktuell stark eingedämmte, ihrer Dynamik entzogene Situation der Fließgewässer (blau)

Die ehemals den Fließgewässern zugeordneten Flächen sind in Relation zum heutigen Klassenausmaß nur noch zu 27% als solche erhalten bzw. flächentreu (vgl. Kap. 6.3 & Abb. 6.14). Der überwiegende Teil insbesondere großer Fließgewässer in des Untersuchungsgebietes wird heute in schmäleren Bahnen geleitet. Ehemals durch regelmäßige Überschwemmung und Materialumlagerungen offengehaltene, weitläufige Uferpartien der historisch großteils unregulierten Fließgewässer sind heute in Ermangelung angepasster dynamischer Prozesse

bewachsen (25% sind heute Grünland, 30% Wald). Auf immerhin gut 9% der Fläche früherer Fließgewässerläufe sind heute Siedlungsgebiete zu verorten. Nur 3% der historischen Fließgewässer wurden von Acker abgelöst, was auch die generelle Tendenz des Rückgangs der Ackerflächen widerspiegelt. Vom aktuellen Ausmaß ausgehend betrachtet, befinden sich die heute knapp 17km² Fließgewässer zu 62% (10km²) auf historischen Fließgewässerflächen und zu 16% auf historischen Wäldern, 11% Grünland, 5% stehenden Gewässern und 3% (Obst)Baumwiesen.

Nur ein Siebtel der historischen Feuchtgebiete konnten für den aktuellen Zustand des Untersuchungsgebietes ermittelt werden. Der erhebliche Rückgang ist in tieferen Lagen bzw. in unmittelbarer Nähe zum Bodensee und dem Rheinstrom bemerkbar. Interessant ist hierbei die nicht vorhandene Konstanz der Landbedeckung (vgl. Kap. 6.3). 69% der historischen Feuchtgebiete sind heute Grünland, die restlichen 30% sind heute Wald, Siedlungsgebiet oder Äcker.

Die stehenden Gewässer verzeichnen ein kleines Plus von knapp 4km². Der kleine Nettounterschied fußt auf doch etwas einschneidenderen Geländeänderungen. So hat die Rheinregulierung und die damit einhergehende Umgestaltung der Bodenseeuferlinie zu einer Flächeneinbuße des Bodensees von 11% geführt (vgl. Kap. 3.1.1.3 & 6.4.4).

Diese Einbußen wiederum werden mit einem Zuwachs von rund 3,6km² über 1500müA, bzw. durch die Anlage von Speicherseen überkompensiert (vgl. Kap. 6.2). Aktuelle stehende Gewässer waren früher zum großen Teil (81%) auch schon stehende Gewässer (vgl. Kap. 6.3).

Die Rheinregulierung hat also mehr Land in der Talsohle geschaffen, während die Zunahme an stehenden Gewässerflächen vor allem über die Speicherseen bei Kraftwerken und im Hochgebirge zu erklären ist, welche Grünland, Wald und natürlich die Fließgewässer heute dauerhaft überstauen (vgl. Abb. 6.23).

Diesen Resultaten des Landbedeckungsvergleichs zufolge können die Eingangs erfolgten Annahmen (vgl. These zu Forschungsfrage i) nicht vollständig als richtig bezeichnet werden. Wie die Zusammenschau der undifferenziert bestockten Flächen zeigt, kann in des Untersuchungsgebietes nur begrenzt von "Verwaldung" als bedeutensten Trend der Aufgabe landwirtschaftlicher Betriebe folgend gesprochen werden [Poyatos et al. 2003]. Der Zuwachs von 80km² (+3,4% des Untersuchungsgebietes) stellt eine beträchtliche Veränderung dar, wird aber von den Veränderungen bezüglich der Klasse Äcker quantitativ überboten (-5% des Untersuchungsgebietes ~ minus 115km²). Der Großteil (74%) dieser ehemaligen Äcker ist heute Grünland und ein wesentlicher Teil (17%) wird aktuell als Siedlungsgebiet und nur 3,6% (5km²) als Wälder genutzt. Eine Dominanz der Zunahme bestockter Flächen konnte nur für die Höhenstufe 1500-2500m ü. Adria eruiert werden (vgl. Abb. 6.8 & 6.9). Der Wandel der Bewirtschaftungsstrukturen scheint in diesen Höhenlagen besonders die Verwaldung zu begünstigen und einem Verlust der Kulturlandschaft einherzugehen [Borsdorf & Bender 2007]. Der Grund für die Aufgabe der Bewirtschaft von zum Teil steilen Mähdern mag verschiedenste Ursachen haben. So kommt beispielsweise mit der Zunahme der Hangneigung auch die Rolle des Schutzwaldes als vorbeugende Maßnahme gegen

Hangrutschung und Lawinen zum tragen, was die Kommunen und Grundbesitzer zur Förderung des Verwaltungsprozesses angeregt haben könnte [Loran 2017].

Das über das gesamte Untersuchungsgebiet hinweg festgestellte Defizit an Flächen mit regelmäßigem Bodenumbruch bzw. Äckern weist in des Untersuchungsgebietes auf eine Aufgabe bzw. Änderung der landwirtschaftlichen Nutzung auf Grenzertragsflächen hin [Bertschinger et al. 2015] [Plieninger et al. 2016]. Dieser Rückgang an Ackerflächen lässt sich örtlich weiter eingrenzen. Die Ackerflächen befinden sich bis auf rund 2 Hektar zur Gänze in den Gebieten unterhalb 1500m Seehöhe mit einer mittleren Höhe von 708müA (1857 lag der Median der Höhe noch 132m höher auf 840müA). Das oben genannte Defizit spielt sich dementsprechend im wesentlichen in dieser Höhenstufe ab. Wie Bätzing beschreibt, durchliefen die Städte der Alpen einen zu Städten des Tieflandes zeitlich verzögerten Prozess der Industrialisierung und Tertiärisierung, was zur Folge hatte, dass ursprünglich reich differenziertes Gewerbe entlang der alten Handelsrouten und die für die Versorgung essenzielle agrarische Nutzung des Hinterlandes wirtschaftlich zunehmend an Bedeutung verloren. Industrielle Entwicklung spielte sich insbesondere nahe an bereits etablierten zentralen Orten ab. Als Folge des Strukturwandels seit dem Zweiten Weltkrieg löste sich die Grenze zwischen Stadt und Land zunehmend zugunsten der Formung von Agglomerationszentren und gut erreichbaren Standorten am Talboden auf [Bätzing 1999]. Wie die Europäische Umwelt Behörde EEA feststellt, finden Urbanisierungsprozesse in Europa vorzugsweise auf bestimmten Landbedeckungsklassen statt. Nämlich zur Hälfte auf „Arable Land & Permanent Crops“ und zu einem Viertel auf „Pastures & Mixed agricultural areas“ [EEA 2018]. Mit einem Schnitt von 11,5ha pro Tag schreitet auch in Österreich dieser Prozess der Versiegelung fort [WWF 10.2021]. Den Statistiken des Umweltbundesamtes zufolge ist in Vorarlberg der aufgrund der Topologie limitierte Dauersiedlungsraum bereits zu einem Drittel verbaut [UBA 2022]. Die aus dem Vergleich der Landbedeckung zu beobachtende Steigerung des Flächenanteils von Siedlungsgebieten und Grünland in dieser Höhenstufe (Bodensee-1500m ü. Adria) spiegelt die beschriebenen Prozesse exemplarisch wider. Neben der Zunahme des Grünlandes weist der Rückgang der Klassen (Obst)Baumwiesen – ehemals charakteristische ökologisch hochwertige Elemente der landwirtschaftlich geprägten Kulturlandschaft – ebenso auf Verschiebungen in der landwirtschaftlichen Flächennutzung hin. An deren Stelle sind heute gleichermaßen (48% und 46%) Wald wie Grünland getreten. Hier wird ein Rückgang althergebrachter Mischnutzung auf landwirtschaftlichen Flächen auffällig [Schindler et al. 2017]. Aufgrund der bereits angesprochenen Unterschiede in der Klassendefinition im historischen respektive dem aktuellen Datensatz sind diese Ergebnisse allerdings mit Vorsicht zu behandeln (vgl. Kap. 7.1). Abgesehen von diesen Unsicherheiten kann der Veränderung der Kulturlandschaft beispielsweise durch Brutstatistiken der diese ökologisch reichhaltigen Landschaften prägenden Tierwelt, den Stellenwert derartiger Habitate in Naturschutzbestrebungen oder die diesem Trend entgegenwirkende aktuelle Agrarförderungspolitik bestätigt werden [Herzog 1998] [Benton et al. 2003] [Stappen 2016]. Letztere versucht durch finanzielle Unterstützungsleistungen zur Erhaltung und Pflege von im Kontext sich zunehmend industrialisierender Landwirtschaft unrentablen Elementen wie z.B. Einzelbäumen und Gehölzgruppen – in diesem Kontext ‚Landschaftselemente‘ genannt - beizutragen um den dafür nötigen erhöhten Einsatz händischer Arbeit zu rechtfertigen [AMA 12.2021].

Weitere Bestätigung der eingangs erstellten Annahmen findet man bezüglich der veränderten Flächenausmaße von Feuchtgebieten und Fließgewässern. Wie Tockner & Stanford bereits im globalen Maßstab herleiten konnten ist ein Rückgang von Flussauen und Feuchtgebieten auch im Untersuchungsgebiet eindeutig nachweisbar [Tockner & Stanford 2002]. Waren zur Zeit der Aufnahme des historischen Datensatzes bereits Ausleitungen in Form von Kanälen und Mühlbächen für die Wasserkraftnutzung zu erkennen, so hat sich seither das Wassermanagement in den Talsohlen durch rigorose Regulierungseingriffe und „Meliorationsprojekte“ [vgl. Bürgi et al. 2015] drastisch geändert. Die Fläche der Fließgewässer beträgt heute rund 43% relativ zum 1857 kartierten Ausmaß der Landbedeckungskategorie. Die einst insbesondere in der Nähe des Bodensees weitläufigen Feuchtgebiete sind weitgehend verschwunden. Die in der Mitte des 19. Jahrhunderts als Feuchtgebiet kartierten Flächen sind im aktuellen Datensatz zum Großteil als Grünland und zu einem geringeren Teil als Wald erkannt worden. Diese Entwicklung zeugt von der ‚Effektivität‘ der Eingriffe am Fließgewässer. Ohne Messungen von Grundwasserständen oder Bodenfeuchte zu berücksichtigen kann aufgrund offensichtlich verminderter hydrologischer Dynamik in den fließgewässernahen Feuchtlebensräumen auf eine Degradation ehemals artenreicher Ökosysteme geschlossen werden. Dieser Reduktion der Feuchtgebietsflächen und Fließgewässerflächen geht wie für den gesamten Alpenraum festgestellt mit dem Heranrücken des urbanen Raumes an Fließgewässer einher [Haidvogel & Tasser 2019].

„Changes are an inherent characteristic of cultural landscapes“ [Bürgi et al. 2015]

Sei es auf intensiv genutzten steilen Bergmähden und mehrstufiger Alpung, den für ein ganzjähriges Überleben einfacher Bauernleute notwendigen Äckern nebst entlegenen Dörfern und Weilern, oder in den fruchtbaren Niederungen des Rheintals – Die Landschaft des Untersuchungsgebietes zeugt von Jahrhunderte andauernder intensiver insbesondere agrarischer Nutzung. Sowohl in den touristisch hochlukrativ genutzten Höhenlagen wie dem zunehmend urban geprägten Rheintal sind die Bedingungen heute völlig verschiedene zu den Zeiten der Aufnahme des Franziszeischen Katasters. Der Vergleich der Landbedeckung kann nur die Auswirkungen der verschiedensten erfolgten Flächennutzungen belegen [Paternoster et al. 2021]. Die Ideale, der Antrieb oder die Werte welche die Nutzung, Prägung und Umgestaltung der Landschaft befeuern bilden sich in Form des Landbedeckungswandels ab und nur eine rationale Bodenpolitik kann eine zukunftsfähige Entwicklung begünstigen [WWF 12.2021] [WWF 1.2022] [Zuluaga et al. 2021].

7.3 Landbedeckungswandel im hochalpinen Raum (vgl. Forschungsfrage ii)

Nach ökologischen Gesichtspunkten betrachtet, kann in Gebieten von Hochgebirge gesprochen werden, sobald Berge über die Wald- und Baumgrenze hinausragen und eine alpine bzw. nivale Stufe aufweisen. In den Alpen variiert die Baumgrenze zwischen 1600m und 2300m Höhe, ist aber durch den Hauptsteuerungsfaktor Temperatur geprägt, welcher in der Wachstumsphase einen Durchschnitt von 6°C erreicht. Parallel dazu ist das Jahresmittel der Schneegrenze bei 0°C [Lozán et al. 2020].

Um demzufolge anhand der verwendeten Daten Aussagen betreffend eines Zuwachses der undifferenziert bestockten Flächen zu erhalten, wurde in Kap. 6.2.1 die Analyse nach Höhenstufen durchgeführt. Die mittlere der drei Stufen (1500-2500m ü. Adria) repräsentiert folglich großzügig die Landbedeckung an der Baumgrenze. Während alle Flächen über 2500m der hochalpinen Stufe zugeordnet werden.

Betrachten wir die in den Analysen ermittelten Zuwachsraten der Flächen mit undifferenzierter Bestockung (Wälder & (Obst)Baumwiesen/Obstanlagen) auf den verschiedenen Höhenstufen (vgl. Abb. 7.2) fällt ins Auge, dass insbesondere zwischen 1500 und 2500m Seehöhe Wald zuwächst (ein Plus von rund 66km²) und im Vergleich zur historischen Situation plus 35% ausmacht, während in tieferen Lagen (unterhalb 1500müA) nur 1,9% (rund 13,7km²) Wälder hinzugekommen sind. Dies vermittelt auch der Anstieg der mittleren Höhe der bestockten Flächen um 92m (vgl. Kap. 6.2.2).

Parallel dazu nimmt das Grünland in der Höhenstufe 1500-2500müA um 5% ab (minus 20km²), während das Grünland über 2500m Seehöhe mit 1,5km² mehr als doppelt so viel Fläche wie im historischen Zustand einnimmt. Daraus kann auf einen Rückgang der agrarischen Landbewirtschaftung in höheren Lagen geschlossen werden. War früher jede Weide notwendig, um die Nahrungssicherheit für das Vieh übers Jahr zu garantieren, ist eine Extensivierung der Almwirtschaft bemerkbar. Dies bestätigt Beobachtungen Vettters und kommt aktuell verstärkt unterhalb der Baumgrenze zur Geltung, gleichzeitig überwinden die Gehölze langsam, vormals durch Schwendung niedrig gehaltene, Baumgrenzen [Vetter 2014]. Im Alpenraum ist die Baumgrenze weitgehend durch den Menschen bestimmt. Jahrhunderte oder länger andauernde Bewirtschaftung haben den Hochgebirgsraum weitgehend geprägt [Lozán et al. 2020]. Die regelmäßige Zurückdrängung und Rodung aufkeimender Gehölze, sowie der jährliche Viehauftrieb auf - und die Mahd von alpinen Wiesenflächen hat zum charakteristischen offenen Landschaftsbild der Almen beigetragen [Vetter 2014].

Dieser aus wirtschaftlicher Notwendigkeit heraus geborene Mehraufwand für im Tal lebende auf Nutztiere angewiesene, stetig zunehmende Landbevölkerung hat mittlerweile seine Renaissance durch eine touristische Nachnutzung gefunden und wird heute sowohl von Landwirten als auch Liftbetreibern weiterbetrieben und bespielt, wengleich die Bewahrung der Vegetationsnarbe bzw. die nachhaltige Wiederansiedlung von Vegetation auf hochalpinen, steilen, stark mechanisch beanspruchten Wintersporttrouten eine stete Herausforderung darstellen [Klug et al. 2013].

In einem größeren Maßstab betrachtet sind die Alpen für Europa bzw. Gebirge im Allgemeinen ein wesentlicher Faktor in der Umsetzung und der Ableitung des Wasserdampfes. Über den Ozeanen aufsteigende wassergesättigte Luftmassen stoßen auf die physischen Barrieren am Festland und ergießen sich dort als Niederschlag. Eine weitere bis dato vorteilhaft hervortretende Eigenschaft der Gebirge ist auf die angepassten klimatischen Bedingungen zurückzuführen, die Wasser in Schnee und Eis bindet und somit für einen gewissen Zeitraum speichert. In diesem Zusammenhang wird von den Gebirgen als Wassertürmen oder Wasserschlössern gesprochen [Tockner 2019].

Die Stabilität der Wasserschlösser ist zunehmend in Gefahr. Als deutlichstes Beispiel ist zu erkennen, dass die Veränderung des Zustandes der Gletscher mit atemberaubendem Tempo fortschreitet. Der winterliche Zuwachs kann schon seit Jahrzehnten global nicht die sommerliche Ablation kompensieren. Der geringe Nachschub lässt die Gletscher an Mächtigkeit verlieren, die talwärts fließenden Eismassen ausdünnen und brüchig werden und an Ausdehnung einbüßen. Dies ist zu einem Großteil mit dem Rückzug der Eismassen seit der Kleinen Eiszeit zu begründen [Mann 2002]. Für die Gletscher weltweit haben Untersuchungen gezeigt, dass zwischen 25 und 35% des Schwundes auch auf anthropogene Umstände zurückzuführen sind [Marzeion et al. 2014]. Die Fortsetzung des Trends scheint unumgänglich und das komplette Abschmelzen für viele bereits stark reduzierte Alpengletscher ist in den kommenden Jahrzehnten als sicher anzunehmen [Zemp & Haeberli 2007] [Zemp et al. 2015].

Auch die Gegenüberstellung des historischen Kartenmaterials mit dem aktuellen Landbedeckungsdatensatz bringt dies zum Ausdruck. In des Untersuchungsgebietes stehen rund 48km² historischer Gletscher rund 6,2km² aktueller Gletscherfläche gegenüber, die sich zudem quasi ausschließlich im Hochgebirge befindet (vgl. Kap. 6.1). Dies entspricht einem Rückgang der Gletscher um 87%. An die Stelle der ehemaligen Gletscherflächen treten heute fast ausschließlich Ödlandflächen (vgl. Kap. 6.3). Dies bringt auch die Verschiebung des Medians der Höhe dieser Landbedeckungsklassen zum Ausdruck. Demnach ist ein Verschiebung der mittleren Gletscherhöhe um 248m (2575 nach 2823müA) und der mittleren Ödlandhöhe um 91m (2144 nach 2235müA) festzustellen (vgl. Kap. 6.2.2).

Die Brisanz des Themas Gletscherschwund wird durch aktuelle Beobachtung und Forschung einhellig beschrieben und erläutert. So zeigen beispielsweise Untersuchungen an Österreichs größtem Gletscher, der Pasterze, dass Schmelzwasserabfluss auf, in oder unter der Gletscherzunge die strukturelle Integrität der Gletscher rapide verschlechtert und somit den Gletscherrückzug weiter beschleunigen [Kellerer-Pirklbauer & Kulmer 2019]. Insbesondere sommerliche Temperaturmaxima im Juli und August beschleunigen Schmelzvorgänge und spielen somit die wesentlichste Rolle im sommerlichen Abschmelzvorgang. Das vor allem deshalb, weil der Gletscher in dieser Zeit oft blank liegt und über keine schützende Schneedecken mehr verfügt. Wie der Vergleich der Flächenbilanz hervorbringt ist die Bilanz des Ödlands über das gesamte Untersuchungsgebiet mit -8% negativ relativ zum historischen Ausmaß dieser Landbedeckung (vgl. Kap. 6.1). Gestaffelt nach Höhenstufen ist dieser Rückgang bis 2500müA festzustellen, während das Ödland über 2500müA starke Zugewinne verzeichnet (vgl. Abb. 6.8 und Abb. 7.2).

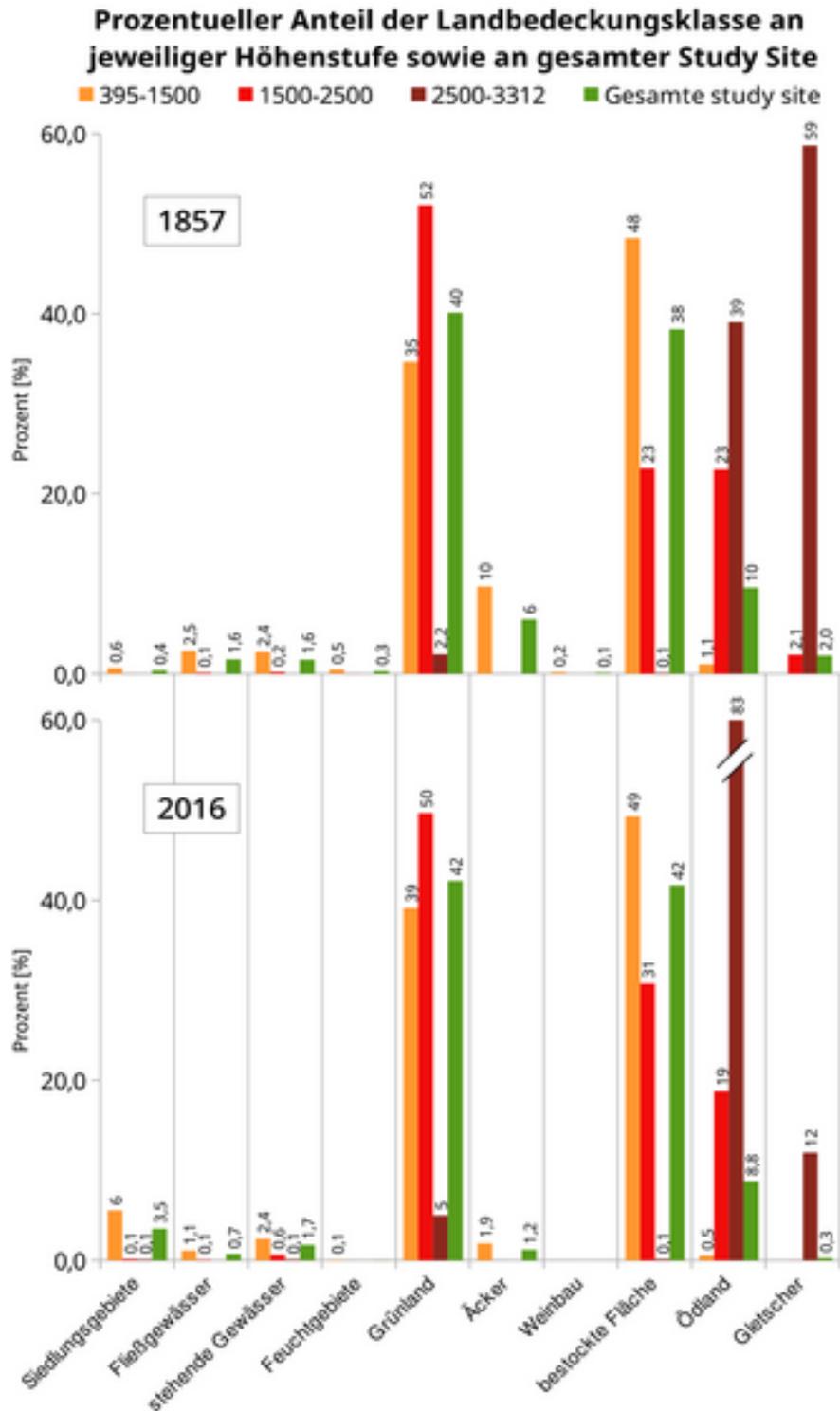


Abbildung 7.2: Prozentueller Anteil der Landbedeckungsklasse an jeweiliger Höhenstufe bzw. am gesamten Untersuchungsgebiet – 1857 (oben) und 2016 (unten)

Der Rückzug der Gletscher ist insbesondere mit der Freilegung von Ödland verbunden und je nach morphologischer Ausprägung in Form von blankem Fels oder mehr oder weniger grobem Geröll ein im Auge zu behaltender Faktor in der Berechnung zukünftiger Massebilanzen (vgl. Kap. 6.2 und Kap. 7.4).

In weiterer Folge ist die Veränderung der Landbedeckung und der klimawandelbedingte Temperaturanstieg im Hochgebirgsraum auch unter dem Aspekt der Verdunstung und Evapotranspiration kritisch zu beachten. Mit dem Rückgang der Gletscherflächen auf 13% ihrer ursprünglichen Ausdehnung sind heute dreiviertel der historisch vereisten Fläche der Klasse Ödland zuzuordnen (vgl. Kap. 6.1 & 6.3). So bringt das Ödland, welches im Vergleich zu Eis und Firnflächen 50% höhere aktuelle Verdunstung ermöglicht eine erhebliche Veränderung des lokalen Wasserhaushaltes mit sich [Menzel et al. 1999].

Die detailliertere Betrachtungsweise der Evapotranspiration berücksichtigt das Zusammenwirken von Bodenverdunstung, Verdunstung auf Pflanzenoberflächen, sowie die Transpiration der Pflanzen [Fitts 2013]. Wie in den Analysen nach Höhenstufen eruiert werden konnte, ist ein Wandern der unterschiedlich stark mit Gehölzen bestockten Flächen nach oben feststellbar. Waren historisch 23% (191km²) des Untersuchungsgebietes zwischen 1500 und 2500m solchen bestockten Flächen zuzurechnen, so können heute bereits rund 31% (258km²) in dieser Höhenstufe als bestockt festgestellt werden. Ebenso ist ein Anstieg des Grünlandes im Hochgebirge über 2500m um 1,5km² festzustellen (vgl. Kap. 6.2). Diese verstärkte Vegetationspräsenz bringt auch einen gesteigerten Einfluss auf die Evapotranspirationsrate im Alpenraum mit sich. In diesem Lichte ist der Gebirgsraum mit zunehmender Besiedelung durch verholzende Gewächse zu höheren Verdunstungsraten prädestiniert. Das Thema der Wasserverknappung kann demnach auch in den Wasserschlössern Europas an Aktualität hinzugewinnen.

Die Bedingungen im Hochgebirge ändern sich aufgrund des Klimawandels zusehends und werden sowohl durch die allmähliche Änderung der Landbedeckung als auch durch spontane Kalamitäten und Extremereignisse erkennbar [Bollmann 2013].

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der Rückgang der Gletscher seit dem Ende der Kleinen Eiszeit um 1850 – ob vom Klimawandel bedingt, oder nur in seinem Abschmelzen beschleunigt – große Ödlandflächen freigibt. Auf den 51,5km², welche innerhalb des Untersuchungsgebietes über 2500m liegen, sind heute rund 83% Ödlandflächen und nur 5% Grünland. Die historisch vergletscherten Flächen sind heute nur mehr zu 13% von Gletschern bedeckt. Anstelle der historischen vergletscherten Flächen treten heute zu 78% Ödland, 8% Grünland, 0,5% Wälder, 0,2% stehende Gewässer und 0,2% Siedlungsgebiet. Es ist wie Fischer et al. dargelegt haben ein langsamer Prozess, welchen eine erfolgreiche Vegetationsansiedelung von einst vereisten Flächen vollführen muss [Fischer et al. 2019]. Der dem Gletscherrückzug einhergehende Landbedeckungswandel bringt verschiedene klimarelevante Herausforderungen mit sich, welche wiederum einer Beeinflussung untereinander unterliegen.

Ist die Dominanz des Ödlands im hochalpinen Raum relativ klar bestätigt worden, so konnte bezüglich der zweiten Hypothese ein gegenläufiges Ergebnis eruiert werden (vgl. Thesen zu Forschungsfrage ii). Wie aus der Analyse nach Höhenstufen hervorgeht, ist entgegen der eingangs formulierten Annahme eine erkennbare Zunahme der undifferenziert bestockten Flächen insbesondere zwischen 1500 und 2500m erfolgt. Wobei in dieser Untersuchung nicht eindeutig Unterschieden werden kann, ob diese Zunahme stärker klimawandelbedingt oder

nutzungsbedingt erfolgt ist. Dieser Flächenzuwachs von rund 66km² bei gleichzeitiger Abnahme des Grünlands (-20km²), des Ödlands (-33km²) und der Gletscher (rund -18km²) im Bereich der Baumgrenze sowie der Anstieg der mittleren Höhe der bestockten Flächen im gesamten Untersuchungsgebiet (+92m - von 1161müA nach 1253müA) legt einen Anstieg der Waldgrenze nahe.

Wie Lozán [2020] ausführt kann der Anstieg der Temperatur und die dadurch erwirkten Folgen insbesondere im Gebirge nachgewiesen werden, da sich dort ein Mosaik an Lebensgemeinschaften entlang der Höhenstufen eng aneinanderdrängt. Gerade im Hochgebirge konnte eine Zunahme der mittleren Jahrestemperatur pro Dekade von 0,3°C gemessen werden - ein Wert der über dem globalen Durchschnitt liegt. So werden regelmäßig Verschiebungen von Habitaten in Richtung ausapernder Gipfel festgestellt. Mit einer dem Wachstumszyklen geschuldeten Trägheit folgen diesem Trend auch die Gehölze.

7.4 Auswirkungen auf das Hochwasserabflussverhalten (vgl. Forschungsfrage iii)

Klima

Klimawandelbedingt kann in großem Maßstab davon ausgegangen werden, dass die mittlere Jahrestemperatur ansteigen, eine Änderung des Temperaturgefüges der Ozeane erfolgen und ein Rückgang der Meereseisflächen zu verzeichnen sein wird. Kleinräumig betrachtet werden Phänomene wie Dürren, Brände und Überflutungen mit einer höheren Frequenz auftreten. In Berggebieten werden mit dem Temperaturanstieg Veränderungen in der Permafrost Verteilung, Gletschermassenbilanz, Veränderungen in synoptischen Wetterereignissen, Verteilung, Frequenz und Intensität von Starkregenereignissen einhergehen [Wood et al. 2020].

Aktuell ist das Abflussregime in des Untersuchungsgebietes durch ein eingipfeliges Abflussregime mit einem Sommermaximum geprägt, wobei die Schneeschmelze (Mai-Juni) und die Gletscherschmelze (Juli-September) hauptsächliche Treiber dieser Verhältnisse sind. Diese eingipfelige Ausprägung stellt eine Abweichung zum theoretischen klimatischen Abfluss dar. Der theoretische Abfluss wird durch die Subtraktion der Verdunstung vom Niederschlag errechnet und ergibt für die Wintermonate einen hohen Abfluss und einen niedrigen Abfluss im Sommer, aufgrund der hohen Verdunstung in den warmen Sommermonaten. Ein Großteil des winterlichen Niederschlags im Gebirge fällt als Schnee und wird über die kalte Jahreszeit nur in geringem Maße abgetragen bzw. dem Abfluss zugeführt. Der tatsächliche Abfluss bleibt in seiner Menge konstant, hat jedoch ein zeitlich verschobenes Profil [Weingartner et al. 2019].

Durch einen generellen Temperaturanstieg kommt es nun insbesondere in tieferen Lagen verstärkt zu pluvialem anstatt nivalem Niederschlag sowie zu vorgezogenem Schmelzen des Schnees. Dieser Abtrag der die Gletscher schützenden Schneeschicht bleibt nicht ohne Konsequenzen. Die Gletscher reagieren auf die erhöhten Temperaturen bereits seit Jahren mit einer negativen Bilanz [Zemp & Haeberli 2007].

Ein Problem stark abschmelzender Gletscher ist die Zunahme des sommerlichen Abflusses. Langjährige Pegelmessreihen geben Einblick in diese Entwicklung, zeigen aber auch, dass schwindende Gletscher mit kontinuierlich reduzierter Masse ab einem gewissen Punkt geringere Abflussmengen hervorbringen und somit den Gipfel ihres Schmelzwasserabflusses bereits überwunden haben. Diese Minderung der Niederschlagsspeicherung in Form von Schnee und Eis im Hochgebirge und somit die Minderung bzw. Aufhebung der temporalen Pufferwirkung verschiebt das alpine Abflussregime vom tatsächlichen nivo-glazialen hin zum klimabedingten theoretischen Abfluss [Weingartner et al. 2019].

Der Temperaturanstieg kann des weiteren zu einer maßgeblichen Veränderung in der Verfügbarkeit gelöster und fester Geschiebefracht führen [Comiti et al. 2019]. Eine vernachlässigte Konsequenz des Gletscherrückgangs, ist die Destabilisierung des unmittelbar freigelegten bzw. angrenzenden Geländes. Die Palette an möglichen Erosionserscheinungen

geht von Runsenbildung, fortschreitendem Geländebruch, Rutschungen, Murabgängen bis zu Felsstürzen. Je nach Auftreten der Ereignisse und deren Dimension können auch unmittelbare Folgen für die Geschiebeverfügbarkeit auf den Gletschern selbst oder den Fließgewässern flussabwärts auftreten. Insbesondere steile Geländemorphologie in Verbindung mit hohen Niederschlägen in Trockenperioden kann diese Hang-Gletscher-Fließgewässer Beziehung unvorteilhaft beeinflussen [Cody et al. 2020].

Die vom talwärts schiebenden Gletscher eingetieften Senken und Depressionen bilden Auffangbecken für rasch abschmelzende Gletscher und bilden somit vielerorts neue Elemente im Gletscherbach. Diese beeinflussen die Geschiebedynamik bereits auf den ersten Metern des Gewässers und sind gleichzeitig je nach Untergrund eine Gefahrenquelle für flussab liegende Regionen [Haeberli et al. 2016].

Die Tatsache der bereits stark geschwundenen Gletscher rückt insbesondere im hochalpinen Raum die Bedeutung des Ödlands in den Vordergrund. Wie bereits in Kapitel 7.3 erörtert, kann der Gletscherschwund nicht im gleichen Maße von nachrückender Vegetation ausgeglichen werden. Die Ausprägungsart des Ödlands und die Wechselwirkung mit dem das Ödland durchströmende Fließgewässer kann dabei grundlegend verschiedene Auswirkung auf den Abfluss bedingen. So ist bei glattem Fels mit geringer hydraulischer Rauigkeit und vernachlässigbarem Infiltrationsvermögen zu rechnen, während Geröll bzw. Geröllauflagen durch Erhöhung der Oberflächenstruktur die Infiltration von Niederschlag steigern und Erosion abschwächen kann [Cerdà 2001] [Descroix et al. 2001] [Li et al. 2016]. Eine wesentliche Rolle kann hierbei allerdings die Verzahnung der Steinfragmente mit dem anliegenden Erdschichten spielen. So belegte Poesen et al. einen Rückgang der Infiltrationskapazität mit zunehmender Einbettung des Gesteins im Boden [Poesen et al. 1990].

Neben diesen teils gegenläufigen Beeinflussungen der Infiltration und der Rauigkeit, kann wie in Kapitel 7.3 erläutert, das Ödland starken Einfluss auf einen weiteren Abflussparameter nehmen - die Evapotranspiration. Demnach verdunstet Wasser auf Ödland schneller, als dies z.B. auf vergletscherten Flächen der Fall ist. Wie Hernegger et al. unterstreichen, kommt es zudem zur systematischen Unterschätzung der Evapotranspiration in der Errechnung von Abflussmodellen. Da Werte zur Evapotranspiration aufgrund der reichhaltigen Geländemorphologie im Hochgebirge relativ schwer messbar und nicht großräumig verfügbar sind, werden hier großteils rechnerische Modelle zur Bestimmung angewandt. Vergleiche dieser Modelle mit realen Messreihen ergeben weitaus höhere Verdunstungsraten als im Modell anzunehmen waren [Hernegger et al. 2012].

In einer Studie analysieren Blöschl et al. die Wahrscheinlichkeit für Hochwasserereignisse europaweit und kommen zum Schluss, dass in Bezug auf den Klimawandel von einem häufigeren Auftreten von Hochwasserereignissen ausgegangen werden kann, da eine globale Temperaturzunahme eine stärkere Wassersättigung der Atmosphäre ermöglicht und somit ein erhöhtes Gefahrenpotential darstellt. Diese Steigerung ist insbesondere für den Nordwesten Europas anzunehmen [Blöschl et al. 2019 b]. Das Untersuchungsgebiet liegt im südlichsten Teil dieser mit einem steigenden Hochwassertrend definierten Zone.

Wie die Hochwassermessdaten im Jahr 2019 dargelegt haben, können mehrere zusammenfallende Wetterphänomene sehr kurzfristig zu dramatischen Auswirkungen auf die Abflussmenge im Alpenrhein führen. Schneereiche Winter mit anschließend langanhaltend hohen Temperaturen und Regenfällen können die Kapazität des kanalisiertes Fließgewässers im Rheintal schnell an seine Grenzen bringen [Mähr et al. 2020].

Der Klimawandel ist als beeinflussender Faktor im Abflussverhalten anzusehen, gleichwohl diese Beeinflussungen lokal und je nach Art der Modellierung sehr unterschiedlich ausfallen kann [Hirabayashi et al. 2013] [IPCC 2021]. Wie in Kapitel 7.3 hergeleitet, sind durch den Rückgang der Gletscher und saisonal verschobenen bzw. verminderten Schneefällen wichtige Pufferfunktionen im Hochgebirge heute in geringerem Maße als 1857 gegeben. Die Resultate dieser Arbeit können keine Aussagen zu den Auswirkungen des Klimawandels für das Untersuchungsgebiet direkt belegen, noch Nachweise für ein mögliches verstärktes Eintreten von bestimmten Auswirkungen und Phänomenen erbringen, doch bringen sie eindrucksvoll zur Schau, welche insbesondere anthropogen induzierte Veränderungen das Untersuchungsgebiet bzw. die HQ300-Abflussräume in einem erdgeschichtlich relativ kurzen Zeitraum vorweisen können.

Landbedeckungswandel im HQ300-Gebiet

In des Untersuchungsgebietes ist die von großen Überflutungsereignissen hauptsächlich betroffene Talsohle durch rege Siedlungstätigkeit, Infrastruktur und landwirtschaftliche Nutzung gekennzeichnet. Wurden historisch entlang von Gewässern insbesondere Mühlen und Hammerwerke sowie an Brückenstandorten Gebäude errichtet, so ist die Siedlungsausbreitung heute in geringerem Maße an Schwemmkegel und Hänge gebunden [Haidvogel & Tasser 2019]. Flussbauliche Maßnahmen haben dafür gesorgt, dass weite Teile des ehemaligen Überflutungsraumes für dauerhafte Siedlungen genutzt werden konnten und heute fest verbaut sind. Das gesamte Untersuchungsgebiet betrachtet, ist der Überflutungsraum im Falle eines HQ300 stark zurückgegangen (vgl. Kap. 6.4.3). Waren es historisch 315km² so stehen aktuell nur mehr 246km² an Ausweichfläche für die Wassermengen bei einem Ereignis dieser Größenordnung zur Verfügung. Aufgrund der Tatsache, dass der Großteil der Hochwasserschutzdämme auf ein HQ100-Ereignis dimensioniert wurde ist anzunehmen, dass der Retentionsraum im Falle eines HQ100-Hochwassers noch bedeutend stärker eingeschränkt wurde, als dies bereits für HQ300-Ereignisse der Fall ist [Mähr & Engler 2021]. Weite Teile der historisch im Rheintal periodisch überfluteten, bereits 1857 größtenteils landwirtschaftlich genutzten Flächen haben eine Landbedeckungsänderung erfahren. So sind die Siedlungsgebiete heute im Überflutungsraum nahezu mit dem Faktor 10 stärker vertreten (vgl. Kap. 6.4 - 6.4.5).

Bei eingehender Betrachtung der Ergebnisse wird erkenntlich, dass der Großteil (62%) des Einzugsgebiet unterhalb 1500m Seehöhe liegt. 98% aller Siedlungsgebiete bezogen auf das Untersuchungsgebiet liegen unterhalb 1500m Seehöhe. Wie aus der graduellen Höhenauswertung hervorgeht, ist eine Absenkung der mittleren Höhe der Siedlungsgebiete sowohl im gesamten Untersuchungsgebiet (-217m) als auch innerhalb des HQ300-Gebietes (-208m) der Fall (vgl. Kap. 6.2.2 und Kap. 6.4.5). Heute sind 14% aller Siedlungsflächen

unterhalb 1500m von HQ300-Ereignissen betroffen. Räumlich konzentriert sich dieser in den Niederungen des Untersuchungsgebietes gelegene HQ300-Gefahrenbereich stark auf das Rheintal. Dies ist jedoch auch die Region Vorarlbergs mit der größten Einwohnerdichte, sowie den großen Produktionsbetrieben des Landes. Die Entwicklung hin zu mehr versiegeltem, verbautem Raum birgt eine erhebliche Steigerung des Schadenspotentials bei Hochwasserereignissen [Naef et al. 2002].

1857 konnte das HQ300-Gebiet zu 12% mit der Klasse der Fließgewässer, zu 22% mit der Klasse der Äcker und zu gut 1% mit Feuchtgebieten abgebildet werden. Heute sind ebendiese Klassen zu einem weit geringeren Prozentsatz im HQ300-Gebiet vorhanden (Fließgewässer 7%, Äcker 5% und Feuchtgebiete 0,4%). Die Betrachtung von (Obst)Baumwiesen und Wäldern als bestockte Flächen ergibt einen Rückgang derselben von ehemals 25% (80km²) zu aktuell 19% (47km²) des vom HQ300-Ereignissen betroffenen Raumes. Neben diesem quantitativen Rückgang (-41%) hat sich die mittlere Höhe aller bestockten Flächen im HQ300-Gebiet um 69m (von 792müA auf 861müA) gehoben, d.h. insbesondere in den tiefen Lagen erfolgte eine Reduktion der Fläche (vgl. Kap. 6.4).

Wurden ehemals bei HQ300-Ereignissen sowohl Äcker mit 70km² als auch Grünland mit 115km², (Obst)Baumwiesen mit 29km² und Feuchtgebiete 4,4km² überflutet, so sind heute zunehmend Siedlungsgebiete (34km²) und Grünland (132km²) im HQ300-Abflussbereich. Diese Entwicklung war insofern vorhersehbar, als Schutzwasserbauwerke und Regulierungsmaßnahmen unter Anderem zur Sicherung des Fließgewässerumlandes für Infrastrukturentwicklung angedacht waren und sind. Allerdings bringen diese Landbedeckungsänderungen ungünstige Verhaltensweisen im Hochwasserfall mit sich: Landbedeckung mit besonders hoher hydraulischer Rauigkeit, wie Wälder und Baumwiesen, sind in erheblichem Maß zurückgegangen. Ein Anstieg von Landbedeckungen geringer Rauigkeit wie Siedlungsgebieten und Grünland ist erkennbar [Seibert & Auerswald 2020a]. Wälder weisen weiters eine hohe Infiltrationsfähigkeit von Niederschlag auf, während diese auf Flächen mit geringer verholztem Bewuchs, wie es auf Äckern oder Feuchtgebieten der Fall ist, je nach Wassersättigungszustand bei Eintritt des Hochwasserereignisses variieren und insbesondere nach anhaltendem Regen abnehmen kann [Alhassoun 2009] [Acreman & Holden 2013] [Nützmann & Moserl 2016].

Mittels des Landbedeckungsvergleichs 1857-2016 sind nun wesentliche Defizite wie die Minderung des natürlichen Hochwasserrückhaltevermögens und die Minderung der Rauigkeit des Abflusskorridors im Untersuchungsgebiet erkennbar.

Wie Weather und Evans feststellen ist die Nutzung und das Management von Land und Wasser untrennbar miteinander verknüpft [Wheater & Evans 2009]. Neben der Abnahme der Infiltrationskapazität der Böden durch die Abnahme der Wälder und die Versiegelung durch Siedlungsgebiete, kann eine weitere negative Beeinträchtigung des Abflussverhaltens im Hochwasserfall eintreten, welche insbesondere für die agrarisch genutzten Flächen von Bedeutung ist. Untersuchungen zufolge kann auch die Art der Bewirtschaftung, die Intensität der Landnutzung oder der zunehmende Einsatz von schweren Maschinen maßgeblichen Einfluss auf Porosität, Infiltrationskapazität und Erosionsresistenz beitragen [Alhassoun 2009] [Keller et al. 2019] [Williams et al. 2020]. Diese Vorgänge kommen im Untersuchungsgebiet

ohnehin nur mehr in geringem Maße zum Tragen aufgrund des starken Rückgangs der Äcker. Die auf agrarische Nutzung hinweisende Landbedeckung - das Grünland - macht 2016 mehr als das zehnfache der Äcker aus. Dabei handelt es sich jedoch nicht nur um landwirtschaftliche Nutzfläche, sondern auch stark mit dem Siedlungsgebiet verzahntes Grün (vgl. Abb. 6.4).

Der prozentuell wie absolut stärkste Anstieg im HQ300-Gebiet kann für die Landbedeckungskategorie Siedlungsgebiete festgestellt werden. Für eine weiterführende Analyse zur Auswirkung dieser Versiegelung müsste insbesondere die Beschaffenheit dieser Kategorie weiter differenziert werden. Eine Schwäche dieser Untersuchung bildet die relativ ungenaue Abbildung der Daten. Insbesondere lineare Elemente außerhalb der Kategorie der Fließgewässer wurden bei der Digitalisierung des Franziszeischen Katasters erst ab einer Breite von über 15m berücksichtigt und die rasterförmige Grundlage des aktuellen Datensatzes bildet lineare Elemente wie beispielsweise Straßen nur abstrahiert ab. Demnach sind weiterführende Aussagen anhand der ermittelten Daten hierzu nur schwerlich möglich.

Einer Simulation zur Resilienz dicht besiedelter Gebiete von Salerno et al. zufolge ist nicht nur entscheidend, welche Landbedeckung in einem Einzugsgebiet vorherrscht, sondern wie diese beschaffen ist. So kann ein größerer Anteil unversiegelter Flächen im Siedlungsgebiet zumindest einen Beitrag zu klimawandelbedingten Veränderungen im Abflussverhalten beitragen [Salerno et al. 2018]. Die Resultate der Untersuchung sind nicht auf die Verfügbarkeit solcher „Patches“ untersucht worden – dies wäre jedoch ein interessanter Anwendungsfall der vorliegenden Daten. Inwiefern sinnvolle Aussagen aufgrund der Rastergröße (10x10m - Landbedeckung 2016) bzw. des Beobachtungsmaßstabes (meist 1:2880 - Landbedeckung 1857) getroffen werden können, müsste hierzu getrennt bewertet werden. Die Studie von Salerno et al. lässt sich einer Reihe von Untersuchungen zuordnen, welche im Management urbaner Gebiete die Bedeutung von unversiegelten Flächen hervorhebt (z.B. [Roon 2007] [Thorne et al. 2015] [Chan et al. 2018]). Die Beschäftigung mit den Qualitäten von verschiedenen Offenflächen im urbanen Raum als Versickerungsflächen im Hochwasserfall bzw. als maßgeblicher Puffer möglicher Hochwasserwellen und die Betonung des Bodens als aktiven Teilnehmer im Hochwasserschutz im Sinne der „Sponge City“ ist im Bilde einer zunehmenden Urbanisierung auch im Rheintal von zunehmender Bedeutung.

Studien zur Auswirkung des Landbedeckungswandels bringen durchaus verschiedene bis gegenläufige Ergebnisse hervor [Rogger et al. 2017]. Die Effekte des Landnutzungswandels sind wie Hall et al. zusammenfassen, in kleineren Einzugsgebieten bei der Modellierung von Hochwasserszenarien besonders zu berücksichtigen. Dies rührt von der Tatsache, dass kurze Starkregenfälle die Hauptursache für Hochwasserereignisse darstellen. Dabei spielt das besonders von der Landbedeckung abhängige Infiltrationsvermögen der Böden eine ausschlaggebende Rolle [Hall et al. 2014].

Die erhebliche Veränderung der Landbedeckung, insbesondere im HQ300-Abflussbereich, weist wie in der Literatur bereits bestätigt, auf eine Veränderung des Hochwasserrisikos in des Untersuchungsgebietes hin. Die deutlich hervortretende Versiegelung ist in hohem Maße

für die Anhebung des Abflussscheitels und den steileren Verlauf von Abflussganglinien verantwortlich [Walsh et al. 2005] [Li & Wang 2009] [O'Driscoll et al 2010]. Demzufolge ergibt sich die Frage, was gegen die drohende Gefahr getan wurde bzw. angedacht ist.

Regulierung

Betrachtet man die verschiedenen Arten an Regulierungsmaßnahmen zum Hochwasserschutz, welche entlang von Fließgewässern in den Alpen im Lauf der Zeit vorgenommen wurden, so können laut Hauer et al. vier wesentliche Zeitabschnitte definiert werden: Bis zum Beginn des 19. Jahrhunderts wurden lokale Maßnahmen gesetzt, von ca. 1800 bis Anfang des 21. Jahrhunderts kamen regionale bzw. abschnittsbezogene Flussbaustrukturen zum Einsatz. Erst seit dem ausgehenden 20. Jahrhunderts fanden Maßnahmen Anwendung, welche sowohl passivem, als auch mobilen Hochwasserschutz zuzuordnen sind [Hauer et al. 2019].

Wie in der Darstellung der Daten bereits erwähnt, hat sich die Überflutungszone auch in des Untersuchungsgebietes stark verändert – weite Teile der historisch im Überflutungsraum gelegenen Flächen wurden durch bauliche Maßnahmen entlang der Fließgewässer zum Schutz anliegender Siedlungsgebiete und Infrastruktur oder im Rahmen elektrischer Wasserverwertung ausgegrenzt. Eine umfassende Vergleichsstudie von Schinegger et al. zeigt, dass die Fließgewässer europaweit und insbesondere in den Alpen ein großes Morphologieproblem haben und eine Korrelation zwischen Einwohnerdichte und morphologischem Druck auf die Fließgewässer bemerkbar ist [Schinegger et al. 2012]. Zu einem ähnlichen Ergebnis kommt man auch nach dem Vergleich, der in Kap. 3.1.1 getätigten kurzen morphologischen Beschreibung der drei größten Fließgewässer in des Untersuchungsgebietes. Ehemals gestreckte Flussläufe in bereits engen Tallagen sind noch heute gestreckt – die Problematik liegt hier eher in der Wasserverfügbarkeit, welche durch Ausleitungen zur elektrischen Nutzung nicht durchwegs gegeben sind. Der starke an Fließgewässer heranrückende Siedlungsdruck ist besonders spürbar in Talsohlen, wo ehemals breite Flussbetten mit verzweigten, gewundenen bis pendelnden Gerinneausformungen auf größtenteils lineare, teils gestaute oder von Sunk und Schwall belastete Gerinne zusammengestaucht worden sind (vgl. Abb. 6.2).

Aus der Transformationsanalyse geht hervor, dass 73% der 1857 als Fließgewässer kartierten Flächen laut der ermittelten Landbedeckung 2016 nicht mehr dieser Landbedeckungsklasse zuzuordnen sind (vgl. Kap. 6.3). Dies könnte auf den ersten Blick durchaus auf eine räumliche Umlagerung der Fließgewässer hinweisen. Betrachtet man jedoch den absoluten Flächenvergleich in des Untersuchungsgebietes, so kann ein Rückgang der Fließgewässer mit einem Minus von rund 22km^2 (-57% relativ zum historischen Klassenausmaß) dargestellt werden (vgl. Kap. 6.1). In Verbindung mit den im HQ300-Abflussraum ermittelten Flächenbilanzen, aus denen die zusätzliche starke Reduktion der Feuchtlebensräume (-80%) und die Abnahme der Ödlandflächen (-30%) hervorgeht (vgl. Kap. 6.4), wird klar, dass in den letzten 160 Jahren massive Einengungen der Fließgewässer stattgefunden haben und dynamischen Umlagerungsprozessen nur mehr wenig Raum zugesprochen wird. Diese Einengung und somit Veränderung der Gerinnegeometrie bestimmt maßgeblich die hydraulischen Eigenschaften der Fließgewässer. Der Abfluss wird über das Produkt von mittlerer Fließgeschwindigkeit und durchflossener

Querschnittsfläche ($q=v \cdot A$) ermittelt [Seibert & Auerswald 2020b]. Bei gleichbleibendem Abfluss ist als Folge dieser Verschmälerung der Gerinne eine Erhöhung der Fließgeschwindigkeit zu erwarten.

Derzeit sind in Österreich zumeist und auch in des Untersuchungsgebietes stark morphologisch beeinträchtigte, begradigte, eingedämmte und teils aufgestaute Fließgewässer der Normalfall [NGP 2015]. Entlang vom Alpenrhein sind nur mehr einige wenige Relikte der historisch weitgreifend ausgeprägten morphologischen Beschaffenheit vorzufinden. Verließ der wilde Alpenfluss historisch von einer zur anderen Talseite pendelnd, Auengebiete durchströmend, kiesige sowie bewachsene Inseln bildend und seinen Flussbettverlauf dynamisch anpassend, so ist das heutige Bild des Alpenrheins eher von kanalisierter Monotonie geprägt. Im schweizerischen Abschnitt des Alpenrheins zeugen noch die Rhäzünser Aue und die Cauma Aue von strukturreichen Habitatsausprägungen dieses Urzustandes [Hocevar et al. 2019].

Können die erfolgten morphologischen Umgestaltungen in des Untersuchungsgebietes in Form von begradigenden Regelprofilen und vielgestaltig ausgeformten Querbauwerken die Fließgewässer im Hochwasserfall lokal bis regional zähmen so bringt dies doch nachhaltige Auswirkungen auf das gesamte Fließgewässer und seinen Sedimenthaushalt mit sich. Insbesondere, wenn wie in Kap. 7.3 hergeleitet, die Fließgewässer im Alpenraum unter dem Aspekt eines zukünftig stärker auch asaisonal schwankenden Abflusses und der damit einhergehenden phasenweise verstärkten Abflachung bzw. Anschwellung der stream power ($\Omega = \text{Abfluss} \cdot \text{Sohlgefälle}$) betrachtet werden müssen. Zur stream power proportional verhält sich nach Lane die Sedimenttransportkapazität des Fließgewässers, zusammengesetzt aus Sedimentvolumen \cdot mittlerem Korngrößendurchmesser [Lane 1955]. Die von Bagnold definierte spezifische stream power (mittlere verfügbare Kraft der Wassersäule über einem Flussbettabschnitt $\sim \omega = \Omega/W$) bringt die stream power mit der Gerinnebreite (W) in Beziehung und Beschreibt die Energie pro Meter Gewässerbreite [Bagnold 1966].

In Anbetracht der erfolgten Veränderung der Fließgewässergeometrie und insbesondere der Verschmälerung der Gerinnebreite kann davon ausgegangen werden, dass sich die spezifische stream power für weite Strecken der untersuchten Fließgewässer weit höher einzuschätzen ist als dies Mitte des 19. Jahrhunderts der Fall war (vgl. Abb. 7.1). Demnach ist zusätzlich zu einer erhöhten Fließgeschwindigkeit eine Konzentration der Energie auf einen geringeren Gerinneraum erfolgt, was einen verstärkten Sedimentaustrag zur Folge hat.

Dass die Beeinflussung des Sedimentgefüges des Alpenrheins zu erheblichen Problemen führen kann, ist schon seit geraumer Zeit ein Thema (vgl. Kap. 3.1.1) – die direkten Auswirkungen der Regulierungseingriffe im Mündungsbereich konnten in Kapitel 6.4.4 dargelegt und quantifiziert werden. Die seit dem 19. Jahrhundert ergriffenen Maßnahmen zur Regulierung des Alpenrheins können somit als wenig nachhaltig bezeichnet werden, da die Materialanreicherung und das drohende Stauszenario nur mittels steter Eingriffe bzw. kontinuierlicher Mündungsvorstreckung abgewendet werden kann.

Die Sedimente können laut Habersack als das „Rückgrat der Alpenflüsse“ bezeichnet werden. Eine Beeinflussung des Sedimenteintrages und des Sedimentkontinuums wirken sich auf die

Morphodynamik der Fließgewässer und somit auf die Ausprägung und Qualität der angehörigen Habitate aus. Flussbauliche Interventionen, von Rampen bis Staumauern, stellen massive Beeinträchtigungen des Stoffaustausches entlang der Gewässerachse dar und prägen das dynamische Potential der Fließgewässer [Habersack et al. 2019].

Wenn das Fließgewässer im Hochwasserfall über die Ufer tritt, kommt die Art der überströmten Gebiete im Verlauf des Abflussgeschehens zu tragen. Neben Gefälle und Querschnittsgeometrie beim Abfluss im Gerinne ist bei Hochwasser die Rauigkeit des Untergrunds im Fließgewässerumland eine wesentliche Einflussgröße. Diese Rauigkeit ist stark durch die Landbedeckung beeinflusst. Hohe Rauigkeit versprechen dichte Wälder. Je niedriger der Bewuchs, desto geringer ist eine verlangsamende Wirkung des Abflusses zu erwarten. Bei versiegeltem glatten Untergrund ist im Gegenzug von einer Beschleunigung auszugehen [Specht 2002] [Seibert & Auerswald 2020a]. Vergleicht man daher die Landbedeckung im HQ300-Gebiet unterhalb 500m Seehöhe, so wird den Fließgewässern nur halb so viel und den Siedlungsgebieten das zwanzigfache des Raumes zu Teil als dies noch in der Mitte des 19. Jahrhunderts der Fall war. Weiters ist hervorzuheben, dass 19% des HQ300-Gebietes unterhalb 500müA laut Franziszeischem Kataster von einer bestockten Fläche (Wälder und Baumwiesen kombiniert) bedeckt war, wohingegen aktuell nur noch 9% des HQ300-Raumes unterhalb 500m mit Wäldern bedeckt sind. Wie im gesamten Untersuchungsgebiet ist auch im HQ300-Gebiet die mittlere Höhe der bestockten Flächen gestiegen. Die räumliche Ausdehnung der bestockten Flächen und insbesondere der Wälder ist in den Tallagen reduziert worden (vgl. Kap. 6.2.2 und Kap. 6.4.5). Unter dem Umstand der starken Zunahme der Versiegelung und dem Rückgang der Wälder ist dem Landbedeckungsvergleich zufolge ein weiterer Parameter des Hochwasserabfluss negativ beeinflusst worden.

Die Wege, die in resilientere Zukunft des Hochwasserrisikomanagements weisen, reichen von mannigfaltigen Anpassungen der urbanen Landschaft und der gebauten Infrastruktur wie z.B. die Ermöglichung der Niederschlagszwischenspeicherung durch Gründächer [Lundström et al. 2020] [Lykseth 2021] oder punktuelle bzw. Infrastruktur begleitende Verbesserung der Versickerungsflächen [Ekka et al. 2021]. Der Fokus muss dabei stets auf der Schaffung von Netzwerken an dynamischen Landschaftselementen liegen, die das Potential haben, einschneidende Extremereignisse rascher abzufedern [Bengtsson et al. 2003] [Teschke & Pasche 2004]. Einzugsgebietsbezogene Ansätze empfehlen Fließgewässern Raum zur Verfügung zu stellen und ein integratives Flussraummanagement anzustreben, welches naturnahe Prozesse erlaubt [Rogger et al. 2017] [Palmer & Ruhi 2019]. Eine vielversprechende Strategie zur Abwendung des akuten Zerstörungsrisikos im Hochwasserfall schreibt demnach die Steigerung des Flächenanteils mit erhöhter natürlicher Dynamik vor. Regelmäßig überstaute Feuchtgebiete bergen zudem auch eine erhöhtes Potential zur Pufferung von Nährstoffen und können so im Hochwasserfall auch der Eutrophierung von Gewässern vorbeugen [Preiner et al. 2020]. Feuchtgebiete waren 1857 noch in einem dem Siedlungsgebiet ähnlichen Ausmaß und einer ähnlichen mittleren Höhe in des Untersuchungsgebietes vorhanden. Seitdem kam es zu einer flächigen Abnahme auf ein Siebtel der historischen Ausdehnung (7,2km² zu 1km²). Heute sind 92% der verbliebenen Feuchtgebiete im HQ300-Überflutungsraum. Der Fortbestand und die Weiterentwicklung dieser bereits stark verknappten Landbedeckungsklasse ist von der lateralen

Konnektivität – dem Austausch des Fließgewässers mit dem Grundwasserkörper - abhängig (vgl. Abb. 7.3).



Abbildung 7.3: Zeugnis historisch (links) vorhandener und aktuell (rechts) mangelhafter lateraler Konnektivität. Historisch vorhandene ausgedehnte Feuchtgebiets- und Auwaldflächen innerhalb des Überflutungsraumes, während aktuell (rechts) Abdämmungsmaßnahmen einen regelmäßigen Austausch von Fließgewässer und wassergeprägtem Lebensraum behindern - Ausschnitt Rhein bei Illmündung

Mittels der Ergebnisse dieser Arbeit kann die angenommene Hypothese eines gestiegenen Hochwasserrisikos durch Regulierungen nicht dezidiert nachgewiesen werden. Landbedeckungsdaten stellen nur einen Parameter für hydraulische Berechnungen dar und können nur sinnvoll als Grundlage für großmaßstäbliche Simulationen herangezogen werden [Borsell & Torri 2010] [Medeiros, et al. 2012] [Zhang et al. 2016]. Im Abgleich mit dem Stand der Forschung weisen die ermittelten Landbedeckungsdaten jedoch auf eine starke qualitative und quantitative Reduktion der Fließgewässer sowie der regelmäßige Durchfeuchtung zulassenden Landbedeckungen bei gleichzeitiger zunehmender Urbanisierung im ehemaligen und aktuellen HQ300-Abflussraum hin. Dadurch kann indirekt auf eine Veränderung der hydraulischen Rauigkeit im ‚active channel‘ der Fließgewässer als auch der überströmten Flächen im Hochwasserabflussraum und somit auf ein verändertes Abflussverhalten mit erhöhtem Schadenspotential im Hochwasserfall geschlossen werden [Rai et al. 2009] [Palla et al. 2016] [Wang, et al. 2016].

Es ist in der Wissenschaft ein stark diskutiertes Thema, ob Überflutungen in der Zukunft stärker auftreten werden. Die zu berücksichtigenden Faktoren sind dabei zu mannigfaltig und stark von lokalen Faktoren abhängig. Was jedoch als gesichert angenommen werden kann, ist die Wirkung von Retentions- und Versickerungsflächen im Hochwasserfall. Ob natürlich vorhanden in Form von Auwald, in gebauter Ausformungen durch Schaffung von dezidierten Hochwasserabflussbecken oder durch größere Flussbettquerschnitte - in all diesen Fällen kann das Zerstörungsausmaß von Überflutungen gelindert werden [Blöschl et al. 2015].

8 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

In dieser Masterarbeit wurde die aktuelle Zusammensetzung der Landbedeckung im österreichischen Einzugsgebiet des Rheins mit dem Zustand um 1857 mittels GIS verglichen und statistisch ausgewertet. Der historische Datensatz basiert auf der Vektorisierung des Franziszeischen Katasters. Der aktuelle Datensatz entstand durch Aggregation mehrerer digital verfügbarer Quellen.

Die vergleichende Analyse ermöglicht die Beantwortung folgender Forschungsfragen:

Was sind die größten Veränderungen bezüglich der Landbedeckung im Einzugsgebiet in den letzten 160 Jahren?

Die Landbedeckung spiegelt seit 1857 den Wandel von einem vorindustriell agrarisch zu einem global vernetzten und industriell geprägten Alpenland wider. Es erfolgte ein Zuwachs der Siedlungsgebiete um 817% auf 83km². Der Schwerpunkt der Verbauung lag dabei in den tieferen Lagen bzw. in den für Vorarlberg kennzeichnenden großen Talsohlen des Rheins und der Ill. Mit dem Wachstum des besiedelten Raumes und der Industrialisierung ging ein dramatischer Rückgang der (Obst)Baumwiesen und des Ackerlandes einher.

Die Gletscher sind auch im Einzugsgebiet des Rheins seit der Kleinen Eiszeit mit einem Minus von 42km² bzw. -87% auf dem Rückzug. Fließgewässer wurden in ihrer Fläche durch Regulierung um 57% reduziert und werden heute intensiv energetisch genutzt. Speicherseen, von Sunk und Schwall belastete Flussabschnitte, sowie Staustrecken sind an die Stelle historisch gewundener und verzweigter Fließgewässer getreten. Feuchtgebiete sind aufgrund der Verlagerung der Wirtschaftsinteressen und des gewässernahen Siedlungsdruckes im vorarlbergischen Rheineinzugsgebiet weitgehend verschwunden (-87% bzw. -6,2km²).

Die Verwaldung ist als Trend insbesondere in der Zone der Waldgrenze (1500 bis 2500müA) klar zu erkennen (+35% bzw. +66km² spärlich bis dicht bestockte Flächen). Im gesamten Untersuchungsgebiet ist die Verwaldung (+8,8% bzw. rund +80km² bestockte Fläche) im Vergleich zum dramatischen Wachstum der Siedlungsgebiete und dem Rückgang der Ackerflächen (-80% bzw. -115km²) nicht als wesentlicher Trend zu verstehen.

Diese Ergebnisse sind insbesondere im Hinblick auf abweichende Klassendefinition (bzgl. (Obst)Baumwiesen/Obstanlagen und Krummholzzonen) im historischen bzw. aktuellen Datensatz nur schwierig interpretierbar, weshalb die Klasse zusammen mit Wäldern zu bestockten Flächen unbestimmten Grades zusammengefasst wurden (vgl. Kap. 7.1). Für die Beantwortung der Frage inwiefern die Verwaldung als wesentlicher Trend in des Untersuchungsgebietes erkennbar sei, wäre eine Ausräumung dieses methodischen Problems durch eine Ausdifferenzierung der Klassen hilfreich.

Wie wirkt sich der Klimawandel auf die Landbedeckung im hochalpinen Raum aus?

Entgegen der postulierten Annahme weiteten sich spärlich bis dicht bestockte Flächen im Bereich der Waldgrenze auf einstigen Wiesen und Weiden merklich aus (+35% bzw. +66km² zwischen 1500-2500müA). Über das gesamte Untersuchungsgebiet betrachtet, stiegen die bestockten Flächen im Median um 92m auf 1253m Seehöhe an. Diese Veränderung (-5% bzw. -20km² Grünland zwischen 1500-2500müA) ist vermutlich primär der Aufgabe der Bewirtschaftung und sukzessiver Verwaldung von Grenzertragsflächen geschuldet als einem rein klimawandelbedingtem Anstieg der Waldgrenze. Die Zunahme der stehenden Gewässer als Folge der Stauung von Flüssen und Reservoirs im Hochgebirge konnte belegt werden (+3,6km² stehende Gewässer über 1500müA - davon 5ha über 2500müA). Der klimawandelbedingte Temperaturanstieg bewirkt durch die immer früher verschwindende schützende Schneedecke ein Abschmelzen der Gletscher im Sommer. Viel langsamer als der Gletscherschwund voranschreitet, wandert die Vegetation in neu entstandene Ödlandflächen ein. Während die Gletscherfläche mit einem Minus von 87% bzw. knapp 42km² zu bilanzieren ist, sind auf den ehemals vergletscherten Flächen heute rund 37km² Ödland und nur rund 4km² Grünland zu finden. Über 2500müA war das Verhältnis Gletscher zu Ödland um 1857 bei 1 zu 0,7 während heute auf einen Teil Gletscher (6,1km²) knapp sieben Teile Ödland (42,6km²) kommen. Über 2500müA sind weiters 1,5km² Grünland, 5ha Siedlungsgebiet, 5ha stehende Gewässer und 2ha locker bis dicht bestockte Fläche hinzugekommen.

Das für die Mitte dieses Jahrhunderts erwartete Verschwinden der Gletscher in weiten Teilen des Alpenraumes kann zum Wechsel des Abflussregimes vom aktuell eingipfeligen, nivo-glazial geprägten zu einer zwei- oder mehrgipfeligen Ausprägung des Regimes führen. Ebenso sind durch die Veränderung der Landbedeckung eine Steigerung der Evapotranspiration und somit ein Rückgang in der sommerlichen Wasserverfügbarkeit zu erwarten.

Mit welchen potenziellen Auswirkungen im Hinblick auf das Hochwasserabflussverhalten ist aufgrund der klimawandel-, landbedeckungs- und regulierungsbedingten Veränderungen zu rechnen?

Für neu hinzugewonnenem Siedlungsraum ist der Überflutungsraum massiv beschnitten worden (-22% bzw. -69km² des historischen HQ300-Abflussraumes). Hinzu kommt, dass früher knapp 4km² Siedlungsgebiete im Falle eines HQ300-Ereignisses direkt betroffen waren, während heute, trotz Rückgang der gesamten HQ300-Überflutungsfläche mit 34km² 8,5-mal so viel Siedlungsgebiete vom HQ300 betroffen sind. Siedlungsgebiete können als wesentliche verdrängende Landbedeckungskategorie des Rheintales in den vergangenen eineinhalb Jahrhunderten angesehen werden. Hinzu kommen nun Häufungen von klimawandelbedingten Extremereignissen, welche bestehende Flussinfrastrukturen an ein fragiles Limit bringen können.

Gestreckte Verläufe kennzeichnen heute die ehemals verzweigten oder pendelnden Flussläufe in den breiten Talsohlen der Ill und des Rhein. Ist die historische

Gerinneausformung insbesondere auf externe Faktoren wie hydrologischem Regime, Sedimentverfügbarkeit, Vegetationsbedeckung und regelmäßigen Hochwässern zurückzuführen, so ist in den letzten 160 Jahren eine starke Verringerung der Fließgewässerflächen (-57% bzw. -22km²) durch zahlreiche Interventionen der Energiewirtschaft, der Siedlungsentwicklung und des Hochwasserschutzes erfolgt. Ehemals morphologisch strukturreichen Fließgewässerabschnitten stehen aktuell Fließgewässer mit monotonen Gerinneausformungen durchsetzt von Quer- und Längsbauwerken gegenüber, die zudem durch Wasserausleitung bei Kraftwerken bzw. der sprunghaften Abflussteigerung im Zuge der Stromproduktion belastet sind.

Neben den Fließgewässern selbst ist auch das Umland von der Absenkung des Grundwasserstandes, der Austrocknung von Gießbächen, der Degeneration und dem Verlust von Feuchtgebieten und Auwäldern geprägt. Dabei sind die wichtigen Funktionen einer funktionierenden Flussau nicht nur lokal, sondern auch im flussab liegenden Einzugsgebiet von großer Bedeutung, unter Anderem auch durch die verlorengegangene Filterwirkung durch Auegebiete. Wälder stellen mit hoher Infiltrationsfähigkeit und hydraulischer Rauigkeit und somit der Verzögerung von Hochwasserwellen wesentliche Beiträge zum Hochwasserschutz dar. Durch Eingrenzung des HQ300-Abflussraumes erfolgte eine Einbuße von 21km² an spärlich bis dicht bestockten Flächen. Der Anstieg der mittleren Seehöhe der bestockten Flächen ist sowohl im gesamten Untersuchungsgebiet (+92m) als auch im HQ300-Gebiet (+69m) nachweisbar und dokumentiert somit den Verlust von Wäldern in der Talsohle.

Die in dieser Masterarbeit erhobenen und analysierten Landbedeckungsdaten geben eine klare Trendlinie hin zu mehr versiegeltem Raum und somit einer Veränderung im Hochwasserabflussverhalten wider. Diesbezügliche Änderungen können die Anhebung des Abflussscheitels und den steileren Verlauf der Abflussganglinie betreffen. Die weiters prognostizierten stoßweisen Abflussmaxima bei Extremwetterereignissen treten aufgrund des Klimawandels in zunehmend unberechenbareren Zyklen und abseits bisheriger Saisonalität auf. Aufgrund der in den Alpen voranschreitenden Verschiebung des Abflussregimes und verstärkten Verdunstungs- und Evapotranspirationsprozessen können Fließgewässer streckenweise austrocknen und ihre Attraktivität für Mensch und Tier verlieren.

Anhand der Resultate dieser Masterarbeit können zwar keine direkten Aussagen im Hinblick auf eine klimawandel- oder regulierungsbedingte Beeinflussung des Abflusses getroffen werden, doch stellt die Quantifizierung und Lokalisierung der Landbedeckungsänderung eine profunde Grundlage dar, diese Frage in weiterer Folge in umfassender Weise interdisziplinär zu diskutieren.

Glossar:

Aktuell	in dieser Masterarbeit dem Jahr 2016 entsprechend
DGM	Digitales Geländemodell
EZG	Einzugsgebiet des Fließgewässers
HQ300-Raum	Überflutungsgebiet bei einem 300 jährlichen Hochwasserereignis (parallel dazu HQ200 / HQ100)
Historisch	in dieser Masterarbeit dem Jahr 1857 entsprechend
LB	Landbedeckung
m ü. Adria / müA / masl	Meter über Adria / meters above sea level / Seehöhe

Zusätzliche Quellen in Abbildungen

3.1 - Seite 9 - [Statistik Austria 2016] – Gliederung Österreichs in NUTS-Einheiten	6.4 - Seite 36 - eigene Darstellung
3.2 - Seite 9 - [AlpineConvention 2020] – Perimeter of the alpine Convention; [Statistik Austria 2016] – Gliederung Österreichs in NUTS-Einheiten	6.5 - Seite 37 - eigene Darstellung
3.3 - Seite 12 - [Mapire 4.2021]	6.6 - Seite 39 - eigene Darstellung
3.4 - Seite 14 - [Mapire 4.2021]	6.7 - Seite 40 - eigene Darstellung
3.5 - Seite 17 - [Mapire 4.2021]	6.8 - Seite 41 - eigene Darstellung
5.1 - Seite 25 - eigene Darstellung	6.9 - Seite 42 - eigene Darstellung
5.2 - Seite 26 - [Mapire 4.2021]	6.10 - Seite 43 - eigene Darstellung
5.3 - Seite 27 - eigene Darstellung	6.11 - Seite 44 - eigene Darstellung
5.4 - Seite 29 - [Mapire 4.2021]	6.12 - Seite 45 - eigene Darstellung
5.5 - Seite 30 - eigene Darstellung	6.13 - Seite 46 - eigene Darstellung
6.1 - Seite 33 - eigene Darstellung	6.14 - Seite 49 - eigene Darstellung
6.2 - Seite 34 - eigene Darstellung	6.15 - Seite 50 - eigene Darstellung
6.3 - Seite 35 - eigene Darstellung	6.16 - Seite 51 - eigene Darstellung
	6.17 - Seite 51 - eigene Darstellung
	6.18 - Seite 53 - eigene Darstellung
	6.19 - Seite 54 - eigene Darstellung
	6.20 - Seite 55 - eigene Darstellung

6.21 - Seite 56 - eigene Darstellung
 6.22 - Seite 58 - eigene Darstellung
 6.23 - Seite 59 - eigene Darstellung
 6.24 - Seite 60 - eigene Darstellung
 6.25 - Seite 60 - eigene Darstellung
 6.26 - Seite 61 - eigene Darstellung
 6.27 - Seite 62 - eigene Darstellung

6.28 - Seite 63 - eigene Darstellung
 6.29 - Seite 65 - eigene Darstellung
 6.30 - Seite 66 - eigene Darstellung
 7.1 - Seite 71 - [Mapire 4.2021]
 7.2 - Seite 77 - eigene Darstellung
 7.3 - Seite 88 - eigene Darstellung

Tabellen

Tabelle 1: Übersicht Datenquellen aktuelle Landbedeckung und Nachbearbeitung einzelner Klassen..... 28

Quellen

Abart, Günther (2020): 200 Jahre Kataster in Österreich - eine Erfolgsgeschichte in: Jahrbuch des Steiermärkischen Landesarchivs; Direktion des Steiermärkischen Landesarchivs - Hammer-Luza, Elke (eds); Graz; 374-389
<https://www.landesarchiv.steiermark.at>

Acreman, M.; Holden, J. (2013): How Wetlands affect floods; Wetlands [33] 773-786
<https://doi.org/2010.1007/s13157-013-0473-2>

Agnoletti, Mauro; Errico, Alessandro; Santoro, Antonio; Dani, Andrea; Preti, Federico (2019): Terraced Landscapes and Hydrogeological Risk. Effects of Land Abandonment in Cinque Terre (Italy) during Severe Rainfall Events; Sustainability [11] 235
<https://doi.org/10.3390/su11010235>

AgrarMarktAustria: Landschaftselemente ab 2015; <https://ama.at/fachliche-informationen/oepul/aktuelle-informationen/2014/landschaftselemente-ab-2015>; abgerufen am 12.12.2021

Alhassoun, Rajeh (2009): Studies on factors affecting the infiltration capacity of agricultural soils; Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen, und Umweltwissenschaften; TU Carolo-Wilhelmina; Braunschweig

Angelstam, Per; Manton, Michael; Yamelynets, Taras; Fedoriak, Mariia; Albulescu, Andra-Cosmina; Bravo, Felipe; Cruz, Fatima; Jaroszewicz, Bogdan; Kavtharishvili, Marika; Munoz-Rojas, Jose; Sijtsma, Frans; Washbourne, Carla-Leanne; Agnoletti, Mauro; Dobrynin, Denis; Izakovicova, Zita; Jansson, Nicklas; Kanka, Robert; Kopperoinen, Leena; Lazdinis, Marius; Metzger, Marc; Van der Moolen, Bert; Özut, Denis; Pavloska Gjorgieska, Dori; Stryamets, Natalie; Tolunay, Ahmet; Turkoglu, Turkey; Zagidullina, Asiya (2021): Maintaining natural and traditional cultural green infrastructures across Europe: learning from historic and current landscape transformations; Landscape Ecology [36] 637-663
<https://doi.org/10.1007/s10980-020-01161-y>

Arnold, Stephan; Kurstedt, Ramona; Riecken, Jens; Schlegel, Burkhard (2017): Paradigmenwechsel in der Landschaftsmodellierung - Von der Tatsächlichen Nutzung hin zu Landbedeckung und Landnutzung; zfv - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement [JG.142 / 1] 30-37

Bagnold, Ralph Alger (1966): An Approach to the Sediment Transport Problem From General Physics; US Geological Survey Professional Paper [442-I]

- Bätzing, Werner (1999): Synthèse: Der Strukturwandel der Alpenstädte von Zentralen Orten zu Vorstädten europäischer Metropolen und die Zukunft der Alpen.; Revue de Géographie Alpine [87-2] 185-199
https://www.persee.fr/doc/rga_0035-1121_1999_num_87_2_2951
- Bätzing, Werner (2003): Die Alpen - Geschichte und Zukunft einer europäischen Kulturlandschaft; C.H. Beck; München [.ISBN %20978-3-406-50185-0](#)
- Baumgartner, A.; Reichel, E.; Weber, G. (1983): Der Wasserhaushalt der Alpen - Niederschlag, Verdunstung, Abfluss und Gletscherspende im Gesamtgebiet der Alpen im Jahresdurchschnitt für die Normalperiode 1931-1960; R. Oldenburg Verlag; München [.ISBN %203486272519](#)
- Baumgartner, Josef (1864): Die Regulierungen am Rheinstrome; Allgemeine Bauzeitung: Österreichische Vierteljahrschrift für den öffentlichen Baudienst [Jg. 29] 268-278
<http://anno.onb.ac.at/cgi-content/anno-plus?aid=abz&datum=1864&page=320&size=30>
- Beger & Binder (1872): Erwidern Kink: Die Korrektion des Rheins im Gebiete von Österreich und der Schweiz.; [Jg. 37] 134, 366ff
- Bengtsson, Janne; Angelstam, Per; Elmqvist, Thomas; Emanuelsson, Urban; Folke, Carl; Ihse, Margareta; Moberg, Fredrik; Nyström, Magnus (2003): Reserves, Resilience and Dynamic Landscapes; AMBIO: A Journal of the Human Environment [32 (6)] 389-396
<https://doi.org/10.1579/0044-7447-32.6.389>
- Benton, T. G.; Vickery, J. A.; Wilson, J. D. (2003): Farmland biodiversity: is habitat heterogeneity the key?; TRENDS in Ecology and Evolution [18] 182-188 [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(03\)00011-9](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(03)00011-9)
- Bertschinger, L.; Baur, R.; Carlen, C.; Frey, J.; Jeangros, B.; Kessler, W.; Viret, O.; Mayor, J-P. (2015): Forschungsbeiträge zur ökologischen Intensivierung für einen nachhaltigeren Schweizer Nutzpflanzenanbau; Agrarforschung Schweiz [6 (9)] 408-415
https://www.agrarforschungschweiz.ch/wp-content/uploads/2019/12/2015_09_2102.pdf
- Bleye, Annette: Entstehung und Entwicklung der Vorarlberger Industrie; <http://wirtschaftsarchiv.v.at/files/Industrie.pdf>; abgerufen 24.11.20
- Blöschl, Günther; Gaál, Ladislav; Hall, Julia; Kiss, Andrea; Komma, Jürgen; Nester, Thomas; Parajka, Juaraj; Perdigao, Rui A.P.; Plavcová, Lenka; Rogger, Magdalena; Salinas, José Luis; Viglione, Alberto (2015): Increasing river floods: fiction or reality?; WIREs Water [2] 329-344
<https://doi.org/10.1002/wat2.1079>
- Blöschl, Günther [a]; Achleitner, Stefan; Gamerith, Valentin; Hübl, Johannes; Humer, Günther et al. (2019): ÖWAV-Regelblatt 220: Niederschlags-Abfluss-Modellierungen in: ÖWAV-Wasser-Abfall-Regelwerk; Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband; Wien; 19ff
<https://www.oewav.at/>
- Blöschl, Günther [b]; Hall, Julia; Viglione, Alberto; Perdigao, Rui A.P.; Parajka, Juraj; Merz, Bruno; Lun, David et al (2019): Changing climate both increases and decreases European river floods; Nature [573] 108-123
<https://doi.org/10.1038/s41586-019-1495-6>
- BMLFUW (2014): HORA - Hochwasserrisikozone Austria; Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft; Wien
- BMLFUW (2015): NGP 2015 - Nationaler Gewässerbewirtschaftungsplan 2015; Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft - Sektion IV; Wien
https://www.bmlrt.gv.at/dam/jcr:0a6b3e92-143b-490e-aaf2-02d0caac2bdc/NGP%202015_Endversion_gsb.pdf
- BMLRT (2019): INVEKOS-GIS - Integriertes Verwaltungs- und Kontrollsystem; Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus; Wien
- BMLRT (WLV) & (BWV) (2020): Gefahrenzonenplan für Extremereignisse bei ca. HQ300; Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus, Sektion I - Wasserwirtschaft; Wien
- Bollmann, Kurt (2013): Klimawandel vor der Tür : Klima- und Landnutzungswandel verändern die

- Artenvielfalt der Alpen; Cratschla - Mitteilungen aus dem Schweizerischen Nationalpark [2] 6
<https://www.e-periodica.ch/digbib/view?pid=cra-001:2013:0::25#97>
- Borsdorf, A.; Bender, O. (2007): Kulturlandschaftsverlust durch Verbuschung und Verwaldung im subalpinen und hochmontanen Höhenstockwerk: Die Folgen des klimatischen und sozioökonomischen Wandels in: Alpine Kulturlandschaft im Wandel: Hugo Penz zum 65. Geburtstag; Eidgenössische Nationalparkkommission ENPK und SCNAT - Forschungskommission des SNP; Innsbruck; 29-50
<https://permalink.obvsg.at/bok/AC06878573>
- Borselli, Lorenzo, Torri, Dino (2010): Soil roughness, slope and surface storage relationship for impervious areas; Journal of Hydrology [393] 389-400
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.09.002>
- Brang, Peter; Schönenberger, Walter; Frehner, Monika; Schwitter, Raphael; Thormann, Jean-Jacques; Wasser, Berchthold (2006): Management of protection forests in the European Alps: an overview; For. Snow Landsc. Res. [80 (1)] 23-44
- Braumann, Sandra M.; Schaefer, Joerg M.; Neuhuber, Stephanie M.; Reitner, Jürgen M.; Lüthgens, Christopher; Fiebig, Markus (2020): Holocene glacier change in the Silvretta Massif (Austrian Alps) constrained by a new 10Be chronology, historical records and modern observations; Quaternary Science Reviews [245] 106493
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106493>
- Briner, Simon; Elkin, Ché; Huber, Robert; Grêt-Regamey, Adrienne (2012): Assessing the impacts of economic and climate changes on land-use in mountain regions: A spatial dynamic modeling approach; Agriculture, Ecosystems and Environment [149] 50-63
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.12.011>
- Brunner, Manuela I.; Farinotti, Daniel; Zekollari, Harry; Huss, Matthias; Zappa, Massimiliano (2019): Future shifts in extreme flow regimes in Alpine regions; Hydrology and Earth System Sciences [23] 4471-4489
<https://doi.org/10.5194/hess-23-4471-2019>
- Buckel, Johannes; Otto, Jan-Christoph; Prasicek, Günther; Keuschnig, Markus (2018): Glacial lakes in Austria - Distribution and formation since the Little Ice Age; Global Planetary Change [164] 39-51
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.03.003>
- Bundesanstalt für Agrarwirtschaft und Bergbauernfragen (2019): INVEKOS-Daten; Bundesanstalt für Agrarwirtschaft und Bergbauernfragen; Wien
- Bundesanstalt für Statistik Österreich: NUTS 2 - Nomenclature des unités territoriales statistiques;
https://data.statistik.gv.at/data/OGDEXT_NUTS_1_STATISTIK_AUSTRIA_NUTS2_20160101.zip;
 abgerufen am 2.4.2021
- Büntgen, Ulf; Urban, Otmar; Krusic, Paul J.; Rybníček, Michal; Kolář, Tomáš; Kyncl, Tomáš; Ač, Alexander; Koňasová, Eva; Čáslavský, Josef; Esper, Jan; Wagner, Sebastian; Saurer, Matthias; Tegel, Willy; Dobrovolný, Petr; Cherubini, Paolo; Reinig, Frederick; Trnka, Miroslav (2021): Recent European drought extremes beyond Common Era background variability; Nature Geoscience [] 1752-0908 <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00698-0>
- Bürgi, Matthias; Salzmann, Daniel; Gimmi, Urs (2015): 264 years of change and persistence in an agrarian landscape: a case study from the Swiss lowlands; Landscape Ecology [30] 1321-1333
<https://doi.org/2010.1007/s10980-015-0189-1>
- Cargill, Samantha K.; Segura, Catalina; Villamizar, Sandra R.; Warren, Dana R. (2021): The influence of lithology on stream metabolism in headwater systems; Ecohydrology [] e2284
<https://doi.org/10.1002/eco.2284>
- Cerdà A. (2001): Effects of rock fragment cover on soil infiltration, interrill runoff and erosion; European Journal of Soil Science [52] 59-68
<https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2001.00354.x>
- Chan, Faith Ka Shun; Griffiths, James A.; Higgitt, David; Xu, Shuyang; Zhu, Fangfang; Tang, Yu-Ting; Xu, Yuyao; Thorne, Colin R. (2018): "Sponge City" in China - A breakthrough of planning and flood risk management in the urban context; Land Use Policy [76] 772-778
<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.03.005>

- Chowdhury, Rinku Roy; Munroe, Darla K.; De Bremond, Ariane (2019): Editorial overview: Seeking solutions to challenges of the Anthropocene: a land systems science perspective; *Current Opinion in Environmental Sustainability* [38] A1-A5
<https://doi.org/10.1016/j.cosust.2019.06.008>
- Cody, Emma; Anderson, Brian M.; McColl, Samuel T.; Fuller, Ian C.; Purdie, Heather L. (2020): Paraglacial adjustment of sediment slopes during and immediately after glacial debuitressing; *Geomorphology* [371] 1-16
- Comiti, F.; Mao, L.; Penna, D.; Dell'Agnese, A.; Engel, M.; Rathburn, S.; Cavalli, M. (2019): Glacier melt runoff controls bedload transport in Alpine catchments; *Earth and Planetary Science Letters* [520] 77-86
- Cousins, Sara A. O.; Auffret, Alistair G.; Lindgren, Jessica; Tränk, Louise (2015): Regional-scale land-cover change during the 20th century and its consequences for biodiversity; *Ambio* [44] 17-27 <https://doi.org/2010.1007/s13280-014-0585-9>
- Davidson, Ana D.; Shoemaker, Kevin T.; Weinstein, Ben; Costa, Gabriel C.; Brooks, Thomas M.; Ceballos, Gerardo; Radeloff, Volker; Rondinini, Carlo; Graham, Catherine H. (2017): Geography of current and future global mammal extinction risk; *PLoS ONE* [12 (11)] e0186934
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0186934>
- De Chazal, Jaqueline; Rounsevell, Mark D.A. (2009): Land-use and climate change within assessments of biodiversity change: A review; *Global Environmental Change* [19] 306-315
<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.09.007>
- Descroix, L.; Viramontes, D.; Vauclin, M.; Gonzales Barrios, J.L.; Esteves, M. (2001): Influence of soil surface features and vegetation on runoff and erosion in the Western Sierra Madre (Durango, Northwest Mexico); *Catena* [43-2] 115-135
[https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(00\)00124-7](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(00)00124-7)
- Dietsche, Daniel; Zarn, Benno (2018): Ellhorn-Sanierung: Für Fische und Menschen ein Gewinn; *Zukunft Alpenrhein* [33] 1-2
https://rheinregulierung.org/media/pages/service/publikationen/2297455439-1575888346/irka_zukunft_alpenrhein_33_juni_2018.pdf
- Drexel, Andreas (2009): Hochwasserabflussspenden im Bezirk Bludenz, Vorarlberg; Department für Bautechnik und Naturgefahren / Institut für Alpine Naturgefahren (IAN); University of Natural Resources and Life Sciences; Vienna
- EEA - European Environment Agency: Urban land take;
<https://www.eea.europa.eu/airs/2018/natural-capital/urban-land-expansion>; Abgerufen am 12.12.2021
- Ekka, S.A.; Rujner, H.; Leonhardt, G.; Blecken, G.-T.; Viklander, M.; Hunt, W.F. (2021): Next generation swale design for stormwater runoff treatment: A comprehensive approach; *Journal of Environmental Management* [279] 11756
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111756>
- Elmi, Marianna; Streifeneder, Thomas; Ravazzoli, Elisa; Laner, Peter; Petitta, Marcello; Renner, Kathrin; Garegnani, Giulia; D'Alonzo, Valentina; Brambilla, Alice; Bassano, Bruno; von Hardenberg, Achaz; Cremer-Schulte, Dominik; Klemenčič, Maša (2018): - The Alps in 25 Maps; Permanent Secretariat of the Alpine Convention; Herzog-Friedrich-Straße 15, A-6020 Innsbruck, Austria
https://www.alpconv.org/fileadmin/user_upload/Publications/25maps.pdf
- Erb, Karl-Heinz; Gingrich, Simone; Krausmann, Fridolin; Haberl, Helmut (2008): Industrialization, Fossil Fuels, and the Transformation of Land Use - An Integrated Analysis of Carbon Flows in Austria 1830-2000; *Journal of Industrial Ecology* [12] 686-703
- Fahrig, L. (2003): Effects of fragmentation on biodiversity; *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics* [34] 487-515
- Fazey, I.; Fischer, J.; Lindenmayer, D.B. (2005): What do conservation biologists publish?; *Biological Conservation* [124 (1)] 63-73
- Fenz, Robert (2014): EU Wasserrahmenrichtlinie 2000/60/EG Österreichischer Bericht der Ist-Bestandsanalyse 2013; BMLFUW - Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft - Sektion Wasser; Marxergasse 2, A-1030 Wien
<https://www.bmlrt.gv.at/dam/jcr:5c3825e6->

[5120-4914-8318-5cfc6876e810/Bericht-Ist-Bestandsanalyse-2013.pdf](https://doi.org/10.1038/s41598-019-50273-2)

Fischer, Andrea; Fickert, Thomas; Schwaizer, Gabriele; Patzelt, Gernot; Groß, Günther (2019): Vegetation dynamics in Alpine glacier forelands tackled from space; Scientific Reports [9] 13918 <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50273-2>

Fitts, Charles R. (2013): 1 - Groundwater: The Big Picture in: Groundwater Science (Second Edition); Academic Press; Waltham - Oxford; 1-22 <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384705-8.00001-7>

Frangez, Christian; Eberstaller, Jürgen (2020): Fischökologisches Monitoring Alpenrhein 2019; IRKA - Internationale Regierungskommission Alpenrhein - Projektgruppe Gewässer- und Fischökologie; Mautern https://www.alpenrhein.net/Portals/0/adam/Content/ZR9FFW8AikODpSaBl19bZQ/Text/Bericht%20Fischökologisches%20Monitoring%20Alpenrhein%202019_FINAL_JUL%2020.pdf

Friebe, Georg J. (2004): Zur Geologie Vorarlbergs – eine Einführung unter besonderer Berücksichtigung verkarstungsfähiger Gesteine; Vorarlberger Naturschau [15] 19-40

Fuhrmann, Susanne (2007): Digitale Historische Geobasisdaten im Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV) Die Urmappe des Franziszeischen Kataster; Österreichische Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation [Jg. 95] 31 <http://www.ovg.at/>

Gariano, Stefano Luigi; Guzzetti, Fausto (2016): Landslides in a changing climate; Earth-Science Reviews [162] 227-252 <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.011>

Geoland: (2020) Digitales Geländemodell (DGM) Österreich; Geoland.at; <https://www.data.gv.at/katalog/dataset/dgm;> abgerufen am 6.6.2020

geoland: (2020) Orthofoto; geoland.at; <https://www.data.gv.at/katalog/dataset/254757be-69ef-4a6c-a4c1-1432815d7522;> abgerufen 6.6.2020

Geoville (2016): LISA - Land Information System Austria; BMVIT-ASAP-ESA; Wien

Giri, Subhasis; Arbab, Nazia N.; Lathrop, Richard G. (2019): Assessing the potential impacts of climate and land use change on water fluxes and sediment transport in a loosely coupled system; Journal of Hydrology [577] 123955 <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.123955>

Giupponi, Carlo; Ramanzin, Maurizio; Sturaro, Enrico; Fuser, Simonetta (2006): Climate and land use changes, biodiversity and agri-environmental measures in the Belluno province, Italy; Environmental Science & Policy [9] 163-173 <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2005.11.007>

Gobiet, Andreas; Kotlarski, Sven; Beniston, Martin; Heinrich, Georg; Rajczak, Jan; Stoffel, Markus (2014): 21st century climate change in the European Alps - A review; Science of Total Environment [493] 1138-1151 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.050>

Gudmundsson, Lukas; Boulange, Julien; Do, Hong X.; Gosling, Simon N.; Grillakis, Manolis G.; Koutroulis, Aristeidis G.; Leonard, Michael; Liu, Junguo; Müller Schmied, Hannes; Papadimitriou, Lamprini; Pokhrel, Yadu; Seneviratne, Sonia I.; Satoh, Yusuke; Thiery, Wim; Westra, Seth; Zhang, Xuebin; Zhao, Fang (2021): Globally observed trends in mean and extreme river flow attributed to climate change; Science [371] 1159-1162 <https://doi.org/10.1126/science.aba3996>

Habersack, Helmut (2000): The river scaling concept (RSC): a basis of ecological assessments; Hydrobiologia [422/423] 49-60

Habersack, Helmut; Aigner, Johann; Haimann, Marlene; Klösch, Mario; Liedermann, Marcel; Hauer, Christoph; Piégay, Hervé (2019): Feststoffhaushalt der Alpenflüsse in: Flüsse der Alpen; Muhar, Susanne; Muhar, Andreas; Egger, Gregory, Siegrist, Dominik; Haupt - Bern; 74-85

Haeberli, Wilfried; Buetler, Michael; Huggel, Christian; Lehmann Friedli, Therese; Schaub, Yvonne; Schleiss, Anton J. (2016): New lakes in deglaciating high-mountain regions - opportunities and risks; Climate Change [139] 201-214

Haidvogel, Gertrud; Eberstaller, Jürgen; Eberstaller-Fleischanderl, Doris; Fraiß, Bernhard; Gabriel, Hannes; Hohensinner, Severin (2018): Historische Landnutzung und Siedlungsentwicklung in Flussauen und Hochwasserschutz: Das Beispiel der Traisen und St. Pölten 1870–2000;

- Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft [70] 305-315 <https://doi.org/10.1007/s00506-018-0473-9>
- Haidvogel, Gertrud; Tasser, Erich (2019): Landnutzung und Siedlungsentwicklung in: Flüsse der Alpen; Muhar, Susanne; Muhar, Andreas; Egger, Gregory, Siegrist, Dominik; Haupt - Bern; 226-237
- Haidvogel, Gertrud; Tasser, Erich (2019): Landnutzung und Siedlungsentwicklung in: Flüsse der Alpen; Muhar, Susanne; Muhar, Andreas; Egger, Gregory, Siegrist, Dominik; Haupt - Bern; 226-237
- Hall, J.; Arheimer, B.; Borga, M.; Brázdil, R.; Claps, P.; Kiss, A. et al. (2014): Understanding flood regime changes in Europe: a state-of-the-art assessment; Hydrology and Earth System Science [18] 2735-2772 <https://doi.org/10.5194/hess-18-2735-2014>
- Hall, Julia; Perdigão, Rui A.P. (2021): Who is stirring the waters?; Science [371] 1096-1097
- Haslinger, K.; Hofstätter, M.; Kroisleitner, C.; Schöner, W.; Laaha, G.; Holawe, F.; Blöschl, G. (2019): Disentangling drivers of meteorological droughts in the European greater alpine region during the last two centuries.; Journal of Geophysical Research: Atmospheres [124] 404-425 <https://doi.org/10.1029/2018JD029527>
- Hauer, Christoph; Wagner, Beatrice; Schober, Bernhard; Haun, Stefan; Noack, Markus; Haidvogel, Gertrud; Luino, Fabio; Zolezzi, Guido; Comiti, Francesco; Hohensinner, Severin; Habersack, Helmuth (2019): Hochwasser und Hochwasserschutz in: Flüsse der Alpen - Vielfalt in Natur und Kultur ; Muhar, Susanne; Muhar, Andreas; Egger, Gregory, Siegrist, Dominik; Haupt - Bern; 238-247
- Hejazi, Mohamad I.; Moglen, Glenn E. (2008): The effect of climate and land use change on flow duration in the Maryland Piedmont region; Hydrological Processes [22] 4710-4722 <https://doi.org/10.1002/hyp.7080>
- Hernegger, Mathew; Nachtnebel, Hans-Peter; Haiden, Thomas (2012): Evapotranspiration in high alpine catchments – an important part of the water balance!; Hydrology Research [43/4] 460-475
- Herzog, F. (1998): Streuobst: a traditional agroforestry system as a model for agroforestry development in temperate Europe; Agroforestry Systems [42] 61-80 <https://doi.org/10.1023/A:1006152127824>
- Hirabayashi, Y.; Mahendran, R.; Koirala, S.; Konoshima, L.; Yamazaki, D.; Watanabe, S.; Kim, H.; Kanae, S. (2013): Global flood risk under climate change; Nature Climate Change [3] 816-821 <https://www.nature.com/doi/10.1038/nclimate1911>
- Hirschberg, Jacob; Fatichi, Simone; Bennet, Georgina L.; McArdell, Brian W.; Peleg, Nadav; Lane, Stuart N.; Schlunegger, Fritz; Molnar, Peter (2020): Climate Change Impacts on Sediment Yield and Debris-Flow Activity in an Alpine Catchment; JGR Earth Surface [126 (1)] e2020JF005739 <https://doi.org/10.1029/2020JF005739>
- Hocevar, Sandra; Bühlmann, Irene; Lubini, Verena (2019): Rhein in: Flüsse der Alpen; Muhar, Susanne; Muhar, Andreas; Egger, Gregory, Siegrist, Dominik; Haupt - Bern; 452-455
- Hoegh-Guldberg, O.; Jacob, D.; Bindi, M.; Brown, S.; Camilloni, I.; Diedhiou, A.; Djalante, R.; Ebi, K.; Engelbrecht, F.; Guiot, J.; Hijjoka, Y.; Mehrotra, S.; Payne, A.; Seneviratne, S. I.; Thomas, A.; Warren, R.; Zhou, G.; Halim, Sharina Abdul; Achlatis, Michelle; Alexander, Lisa V.; Allen, Myles; Berry, Peter; Boyer, Christopher; Byers, Edward; Brilli, Lorenzo; Buckeridge, Marcos; Cheung, William; Craig, Marlies; Ellis, Neville; Evans, Jason; Fischer, Hubertus; Fraedrich, Klaus; Fuss, Sabine; Ganase, Anjani; Gattuso, Jean Pierre; Greve, Peter; Bolaños, Tania Guillén; Hanasaki, Naota; Hasegawa, Tomoko; Hayes, Katie; Hirsch, Annette; Jones, Chris; Jung, Thomas; Kanninen, Markku; Krinner, Gerhard; Lawrence, David; Lenton, Tim; Ley, Debora; Liverman, Diana; Mahowald, Natalie; McInnes, Kathleen; Meissner, Katrin J.; Millar, Richard; Mintenbeck, Katja; Mitchell, Dann; Mix, Alan C.; Notz, Dirk; Nurse, Leonard; Okem, Andrew; Olsson, Lennart; Oppenheimer, Michael; Paz, Shlomit; Petersen, Juliane; Petzold, Jan; Preuschmann, Swantje; Rahman, Mohammad Feisal; Rogelj, Joeri; Scheffele, Hanna; Schleussner, Carl-Friedrich; Scott, Daniel; Séférian, Roland; Sillmann, Jana; Singh, Chandni; Slade, Raphael;

- Stephenson, Kimberly; Stephenson, Tannecia; Sylla, Mouhamadou B.; Tebboth, Mark; Tschakert, Petra; Vautard, Robert; Wartenburger, Richard; Wehner, Michael; Weyer, Nora M.; Whyte, Felicia; Yohe, Gary; Zhang, Xuebin; Zougmore, Robert B. (2018): Impacts of 1.5°C Global Warming on Natural and Human Systems; IPCC Secretariat; <https://hdl.handle.net/10138/311749>
- Hohensinner, Severin; Becsi, Renate; Egger, Gregory; Fiebig, Markus; Knopper, Friedrich; Muhar, Susanne; Piégay, Hervé (2019): Morphologie in: Flüsse der Alpen; Muhar, Susanne; Muhar, Andreas; Egger, Gregory, Siegrist, Dominik; Haupt - Bern; 86-111
- Hohensinner, Severin; Herrnegger, Mathew, Blaschke, Alfred P.; Habereeder, Christine; Haidvogel, Gertrud; Hein, Thomas; Jungwirth, Mathias; Weiß, Michael (2008): Type-specific reference conditions of fluvial landscapes: A search in the past by 3D-reconstruction; Catena [75] 200-215
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.06.004>
- Hohensinner, Severin; Jungwirth, Mathias; Muhar, Susanne; Schmutz, Stefan (2014): Importance of multi-dimensional morphodynamics for habitat evolution: Danube River 1715–2006; Geomorphology [215] 3-19
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.08.001>
- Illwerke vkw AG: Vermuntsee;
<https://www.illwerkevkw.at/vermuntsee.htm>;
abgerufen am 1.2.2021
- Illwerke vkw AG: KW Andelsbuch;
<https://www.illwerkevkw.at/kw-andelsbuch.htm#>; abgerufen am 1.2.2021
- IRKA Internationale Regierungskommission Alpenrhein und IRR Internationale Rheinregulierung: Geschiebeführung;
<https://www.alpenrhein.net/Der-Alpenrhein/Geschiebefuehrung>; abgerufen am 30.1.2021
- IRR - Internationale Rheinregulierung: Der Alpenrhein - Fakten Internationale Strecke;
<https://rheinregulierung.org/alpenrhein/fakten>;
abgerufen am 30.1.2021
- Jackson, Jeremy B.C.; Kirby, Michael X.; Berger, Wolfgang H.; Bjørndal, Karen A.; Botsford, Louis W.; Bourque, Bruce J. et al (2001): Historical overfishing and the recent collapse of coastal ecosystems; Science [293] 629-638
- Jungwirth, Mathias; Haidvogel, Gertrud; Moog, Otto; Muhar, Susanne; Schmutz, Stefan (2003): Angewandte Fischökologie an Fließgewässern - Forschungsfragen im Rahmen der Fließgewässer- und Fischökologie; Facultas Universitätsverlag; Wien
- Kaiser, Markus: Historische Flussbreiten und -tiefen des Alpenrheins;
<https://www.lebendigerrhein.org/index.php?id=8878>; abgerufen am 1.2.2021
- Kaiser, Markus (Version vom 19.05.2020) : Rhein; HLS - Historisches Lexikon der Schweiz;
<https://hls-dhs-dss.ch/de/articles/008768/2020-05-19/>; abgerufen am 04.07.2020
- Keiler, M.; Sailer, R.; Jörg, P.; Weber, C.; Fuchs, S.; Zischg, A.; Sauer Moser, S. (2006): Avalanche risk assessment – a multi-temporal approach, results from Galtür, Austria; Natural Hazard and Earth System Sciences [6] 637-651
<https://doi.org/10.5194/nhess-6-637-2006>
- Keller, Thomas; Sandin, Maria; Colombi, Tino; Horn, Rainer; Or, Dani (2019): Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning; Soil & Tillage Research [194] 104293
<https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104293>
- Kellerer-Pirklbauer, Andreas; Kulmer, Bernd (2019): The evolution of brittle and ductile structures at the surface of partly debris-covered, rapidly thinning and slowly moving glacier in 1998-2012 (Pasterze Glacier, Austria); ESPL - Earth Surface Processes and Landforms [44] 1034-1049
- Klug, Brigitte; Markart, Gerhard; Meier, Jürgen; Krautzer, Bernhard; Kohl, Bernhard (2013): Ski Run Re-Vegetation: A Never-Ending Story of Trial and Error? in: The Impacts of Skiing on Mountain Environments; Bentham Science Publishers; Sharjah U.A.E.; 155-183
https://www.academia.edu/download/42053702/Ground-Dwelling_Arthropods_and_Ski-Piste20160204-3118-ba4o5d.pdf
- Krapf, Philipp (1937): Die österreichisch-schweizerische Rheinregulierung zwischen der Ill-Mündung und dem Bodensee; Wasserwirtschaft und Technik [] 223
- Landesamt für Vermessung und Geoinformation Vorarlberg: GeoServer WMS VoGIS;
<http://vogis.cnv.at/geoserver/ows?>

- [version=1.1.0&srsName=EPSG:31254&typeName=vogis:waldkarte&outputFormat=shape-zip;](#)
abgerufen am 1.2.2021
- Lane, E.W. (1955): The importance of morphology in hydraulic engineering; Proceedings of the American Society of Civil Engineers [81] paper no. 745
- Li, Tianyang; He, Binghui; Chen; Zhanpeng; Zhang, Yi; Liang, Chuan (2016): Effects of gravel on infiltration, runoff, and sediment yield in landslide deposit slope in Wenchuan earthquake area, China; Environ Sci Pollut Res [23] 12075-12084
<https://doi.org/2010.1007/s11356-016-6394-x>
- Li, Yingkui; Wang. Cuizhen (2009): Impacts of Urbanization on Surface Runoff of the Dardenne Creek Watershed, St. Charles County, Missouri; Physical Geography [30:6] 556-573
<https://doi.org/10.2747/0272-3646.30.6.556>
- Loran, Christin (2017): Exploring long-term forest cover changes and their driving forces in Switzerland (1850-2000); ETH - Zürich; ; Zürich
<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000228368>
- Losapio, Gianalberto, Cerabolini, Bruno E.L.; Maffioletti, Chiara; Tampucci, Duccio; Gobbi, Mauro; Caccianiga, Marco (2021): The Consequences of Glacier Retreat Are Uneven Between Plant Species; Frontiers in Ecology and Evolution [8] 616562
<https://doi.org/10.3389/fevo.2020.616562>
- Löschner, Lukas; Hernegger, Mathew; Hohensinner, Severin; Niedermayr, Julia; Nordbeck, Ralf; Seher, Walter; Wagner, Klaus; Wesemann, Johannes (2019): Flood risk management in mountain regions: a policy coordination perspective; EGU General Assembly 2019 [21]
- Lozán, J.L.; Breckle, S.-W.; Escher-Vetter, H.; Graßl, H.; Kasnag, D.; Paul, F.; Schickhoff, U. (2020): Hochgebirge: Definition, Bedeutung, Veränderung und Gefahren in: Warnsignal Klima: Hochgebirge im Wandel; Lozán, J.L.; Breckle, S.-W.; Escher-Vetter, H.; Graßl, H.; Kasnag, D.; Paul, F.; Schickhoff, U.; Hamburg; 11-20
- LUCAS: LUCAS - Land use and land cover survey;
[https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/LUCAS - Land use and land cover survey#Defining land use.2C land cover and landscape;](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/LUCAS_-_Land_use_and_land_cover_survey#Defining_land_use.2C_land_cover_and_landscape;)
abgerufen am 28.11.2020
- Lundström, T. Staffan; Åkerstedt, Hans O.; Larsson, I. A. Sofia; Marsalek, Jiri; Viklander, Maria (2020): Dynamic Distributed Storage of Stormwater in Sponge-Like Porous Bodies: Modelling Water Uptake; water [12] 2080
<https://doi.org/10.3390/w12082080>
- Lykseth, Henning (2019): Biochar in green roofs to increase water uptake and retention - A way to manage stormwater runoff in urban areas; Faculty of Technology, Natural Sciences and Maritime Sciences; University of South-Eastern Norway; Kongsberg
<https://hdl.handle.net/11250/2771618>
- Madsen, H.; Lawrence, D.; Lang, M.; Martinkova, M.; Kjeldsen, T.R. (2014): Review of trend analysis and climate change projections of extreme precipitation and floods in Europe; Journal of Hydrology [519] 3634-3650
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.11.003>
- Mähr, Markus; Engler, Marlene (2021): Rhesi auf einen Blick; Rhesi Magazin [13] 2-3
https://rheinregulierung.org/media/pages/service/news-overview/rhesi-magazin-nr-13-januar-2021/1498845470-1611238397/rhesi_zeitung_13_v10_druck.pdf
- Mähr, Markus; Schatzmann, Markus; Valenti, Bernhard; Anrig, Christoph; Wächter, Hans-Peter (2020): Hochwasserereignisse 2019; Rhesi Magazin [12] 6
https://rheinregulierung.org/media/pages/service/news-overview/rhesi-magazin-12-juni-2020/843684867-1591718513/internationale-rheinregulierung_rhesi-magazin_12_juni-2020.pdf
- Mann, Michael E. (2002): The Earth system: physical and chemical dimensions of global environmental change in: Encyclopedia of Global Environmental Change; John Wiley & Sons Ltd; Chichester; 504-509
- Mapire: Habsburg Empire - Cadastral maps (XIX. century) / Aerial View; [https://mapire.eu/en/;](https://mapire.eu/en/)
abgerufen am 1.4.2021

- Marsh, Christopher Marriage; Davies, Ernest Albert John: Canals and inland waterways - Encyclopedia Britannica Inc.; <https://www.britannica.com/technology/canal-waterway>; abgerufen am 19.3.2021
- Marzeion, Ben; Cogley, Graham J.; Richter, Kristin; Parkes, David (2014): Attribution of global glacier mass loss to anthropogenic and natural causes; Science [345] 919-921
- McGrane, Scott J. (2016): Impacts of urbanisation on hydrological and water quality dynamics, and urban water management: a review; Hydrological Sciences Journal [61 (13)] 2295-2311 <https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1128084>
- Medeiros, Stephen, C.; Hagen, Scott, C.; Weishampel, John, F. (2012): Comparison of floodplain surface roughness parameters derived from land cover data and field measurements; Journal of Hydrology [452-453] 139-149 <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.043>
- Mejía, Alfonso; Rossel, Florian; Gironás, Jorge; Jovanovic, Tijana (2015): Anthropogenic controls from urban growth on flow regimes; Advances in Water Resources [84] 125-135 <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.08.010>
- Menzel, L.; Lang, H.; Rohmann, M. (1999): Mittlere jährliche aktuelle Verdunstungshöhen 1973-1992 in: Hydrologischer Atlas der Schweiz; Spreafico M., Weingartner R., Leibundgut C. (eds); Bern; Tafel 4.1 https://hydrologischeratlas.ch/downloads/01/content/Text_Tafel41.de.pdf
- Meyer, William B.; Turner II, B. L. (1994): Changes in Land Use and Land Cover - A Global Perspective; Cambridge University Press; Cambridge - UK [.ISBN%200%20521%2047085%204](https://doi.org/10.1017/C020521%2047085%204)
- Milliman, J.D.; Farnsworth, K.L.; Jones, P.D.; Xu, K.H.; Smith, L.C. (2008): Climatic and anthropogenic factors affecting river discharge to the global ocean, 1951-2000; Global and Planetary Change [62] 187-194 <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2008.03.001>
- Misset, C.; Recking, A.; Legout, C.; Bakker, M.; Gimbert, F.; Geay, T.; Zanker, S. (2020): Using Continuous Turbidity and Seismic Measurements to Unravel Sediment Provenance and Interaction Between Suspended and Bedload Transport in an Alpine Catchment; Geophysical Research Letters [48 (4)] e2020GL090696 <https://doi.org/10.1029/2020GL090696>
- Morozova, Galina S. (2005): A review of Holocene avulsions of the Tigris and Euphrates rivers and possible effects on the evolution of civilizations in lower Mesopotamia; Geoarcheology [20] 401-423 <https://doi.org/10.1002/gea.20057>
- Muhar, S; Grüner, B; Böck, K; Scheickl, S; Becsi, R (2018): SPARE synthesis report: Balancing river protection needs, ecosystem function and human uses.; European Regional Development Fund (ERDF) - Interreg Alpine Space; Vienna
- Mulugetta Fratkin, Michael; Segura, Catalina; Bywater-Reyes, Sharon (2020): The influence of lithology on channel geometry and bed sediment organization in mountainous hillslope-coupled streams; Earth Surface Processes and Landforms [45] 2365-2376 <https://doi.org/10.1002/esp.4885>
- Naef, Felix; Scherrer, Simon; Weiler, Markus (2002): A process based assessment of the potential to reduce flood runoff by land use change; Journal of Hydrology [267] 74-79 [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00141-5](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00141-5)
- Naturpark Karwendel: Holztransport; <https://www.karwendel.org/wege-des-holzes/wiki/holztransport/>; abgerufen am 19.3.2021
- Neupane, Ram P.; Kumar, Sandeep (2015): Estimating the effects of potential climate and land use changes on hydrologic processes of a large agriculture dominated watershed; Journal of hydrology [529] 418-429 <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.07.050>
- Nowotny, Axel; Pestal, Gerhard; Rockenschaub, Manfred (1993): Der geologische Bau der nördlichen Silvretta-Gruppe und die Problematik der geologischen Stellung der Zone von Puschlin; Geologische Bundesanstalt; Wien [.ISBN%20203-900312-88-7](https://doi.org/10.1017/C020203-900312-88-7)
- Nützmann, Gunnar; Moser, Hans (2016): Elemente einer analytischen Hydrologie - Prozesse - Wechselwirkung - Modelle - Flussauen als Retentionsräume und Pufferzonen; Springer Spektrum; Wiesbaden <https://doi.org/10.1007/978-3-658-00311-1>
- O'Driscoll, Michael; Clinton, Sandra; Jefferson, Anne; Manda, Alex; McMillan, Sara (2010): Urbanization

- Effects on Watershed Hydrology and In-Stream Processes in the Southern United States; Water [2] 605-648 <https://doi.org/10.3390/w2030605>
- ÖStA/KA - Österreichisches Staatsarchiv / Kriegsarchiv: Franziszeische Landesaufnahme (Zweite Landesaufnahme) (1806-1869) Topographische Anstalt; Maßstabsbereich: 1:144.000
- Oudin, Ludovic; Salavati, Bahar; Furusho-Percot, Carina; Ribstein, Pierre; Saadi, Mohamed (2018): Hydrological impacts of urbanization at the catchment scale; Journal of Hydrology [559] 774-786 <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.064>
- Palla, A.; Colli, M.; Candela, A.; Aronica, G.T.; Lanza, L.G. (2016): Pluvial flooding in urban areas: the role of surface drainage efficiency; Journal of Flood Risk Management [11] 663-676 <https://doi.org/10.1111/jfr3.12246>
- Palmer, Margaret; Ruhi, Albert (2019): Linkages between flow regime, biota and ecosystem processes: Implications for river restoration; Science [365] eaaw2087 <https://doi.org/10.1126/science.aaw2087>
- Paternoster, D.; Danzinger, F.; Koukal, T.; Kudrnovsky, H.; Lackner, S.; Berger, A.; Schadauer, K.; Wrbka, T.; Stejskal-Tiefenbach, M.; Ellmauer, T. (2021): Strategischer Rahmen für die Restauration von Ökosystemen; Umweltbundesamt GmbH; Wien Österreich https://www.umweltbundesamt.at/studien-reports/publikationsdetail?pub_id=2370&cHash=4babebf3d5c56f46ecdeac55d9ea4bc6
- Pervez, Md Shariar; Henebry, Geoffrey M. (2015): Assessing the impacts of climate and land use and land cover change on the freshwater availability in the Brahmaputra River basin; Journal of Hydrology: Regional Studies [3] 285-311 <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2014.09.003>
- Plattform lebendiger Rhein: Revitalisierung - Rheinkanal in den Bodensee; <https://www.lebendigerrhein.org/index.php?id=8469>; abgerufen am 1.2.2021
- Plieninger, Tobias; Draux, Hélène; Fagerholm, Nora; Bieling, Claudia; Bürgi, Matthias; Kizos, Thanasis; Kuemmerle, Tobias; Primdahl, Jørgen; Verburg, Peter H. (2016): The driving forces of landscape change in Europe: A systematic review of the evidence; Land Use Policy [57] 204-214 <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.04.040>
- Plitzner, Klaus: Elektrizität in Vorarlberg - Vom Luxusgut zur alltäglichen Selbstverständlichkeit! Odr?; <https://wirtschaftsarchiv-v.at/files/Elektrizitaet.pdf>; abgerufen 24.11.20
- Poesen, J.; Ingelmo-Sanchez, F.; Mucher, H. (1990): The hydrological response of soil surfaces to rainfall as affected by cover and position of rock fragments in the top layer; Earth Surface Processes and Landforms [15-7] 653-671 <https://doi.org/10.1002/esp.3290150707>
- Pohl, Reinhard (2020): Quantifying resilience in hydraulic engineering: Floods, flood records, and resilience in urban areas; WIREs Water [7] e1431 <https://doi.org/2010.1002/wat2.1431>
- Poratelli, Francesca; Accastello, Cristian; Freppaz, Michele; Brun, Filippo (2020): Integrated grey-green management of avalanche risk: Economic and ecologic evidences from the Western Italian Alps; International Journal of Disaster Risk Reduction [46] 101502 <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101502>
- Power, Alison G. (2010): Ecosystem services and agriculture: tradeoffs and synergies; Philosophical Transactions of the Royal Society B [365] 2959-2971 <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0143>
- Poyatos, Rafael; Latron, Jérôme; Llorens, Pilar (2003): Land Use and Land Cover Change After Agricultural Abandonment; Mountain Research and Development [23 / 4] 362-368 [https://doi.org/10.1659/0276-4741\(2003\)023%5B0362:LUALCC%5D2.0.CO;2](https://doi.org/10.1659/0276-4741(2003)023%5B0362:LUALCC%5D2.0.CO;2)
- Preiner, S.; Bondar-Kunze, E.; Pitzl, B.; Weigelhofer, G.; Hein, T. (2020): Effect of Hydrological Connectivity on the Phosphorous Buffering Capacity of an Urban Floodplain; Frontiers in Environmental Science [8] 147 <https://doi.org/2010.3389/fenvs.2020.00147>
- PSAC - Permanent Secretariat Alpine Convention - Piva Aureliano: Perimeter of the Alpine

- Convention;
https://www.atlas.alpconv.org/layers/geonode_data:geonode:Alpine_Convention_Perimeter_2018_v2#share;
- Rai, R.K.; Upadhyay, A.; Singh, V.P. (2009): Effect of variable roughness on runoff; Journal of Hydrology [382] 115-127
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.12.022>
- Rogger, M.; Agnoletti, M.; Alaoui, A.; Bathurst, J.C.; Bodner, G.; Borga, M.; Chaplot, V.; Gallart, F.; Glatzel, G.; Hall, J.; Holden, J.; Holko, L.; Horn, R. et al (2017): Land use change impacts on floods at the catchment scale: Challenges and opportunities for future research; Water Resources Research [53] 5209-5219
- Roon, Majorie van (2007): Water localisation and reclamation: Steps towards low impact urban design and development; Journal of Environmental Management [83] 437-447
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.04.008>
- Rutherford, Gillian N.; Bebi, Peter; Edwards, Peter J.; Zimmermann, Niklaus E. (2008): Assessing land-use statistics to model land cover change in a mountainous landscape in the European Alps; Ecological Modelling [212] 460-471
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.10.050>
- Salerno, Franco; Gaetano, Viviano, Tartari, Gianni (2018): Urbanization and climate change impacts on surface water quality: Enhancing the resilience by reducing impervious surfaces; Water Research [144] 491-502
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.07.058>
- Schindler, S.; Banko, G.; Neuwirth, M.; Lackner, S.; Grillmayer, R.; Paternoster, D.; Staudinger, M.; Zuna-Kratky, T.; Gallmetzer, N.; Sauberer, N.; Richter, P.; Heimbuch, H.; Guariento, E.; Wegleitner, S.; Adam, M.; Hofmeister, J.; Essl, I.; Oberleitner, I.; Stejskal-Tiefenbach, M. (2017): Österreichisches Biodiversitäts-Monitoring (ÖBM) - Kulturlandschaft; Umweltbundesamt GmbH; Wien Österreich
<https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0720.pdf>
- Schinegger, Rafaela; Trautwein, Clemens; Melcher, Andreas; Schmutz, Stefan (2012): Multiple human pressures and their spatial patterns in European running waters; Water and Environment Journal [26/2] 261-273 <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2011.00285.x>
- Schleussner, Carl-Friedrich; Deryng, Delphine; D'haen, Sarah; Hare, William; Lissner, Tabea; Ly, Mouhamed; Nauels, Alexander et al. (2018): 1.5 C Hotspots: Climate Hazards, Vulnerabilities, and Impacts; Annual Review of Environment and Resources [43] 135-63
<https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102017-025835>
- Schmidt-Kloiber, Astrid; Bremerich, Vanessa; De Wever, Aaike; Jähnig, Sonja C.; Maertens, Koen; Strackbein, Jörg; Tockner, Klement; Hering, Daniel (2019): The Freshwater Information Platform: a global online network providing data, tools and resources for science and policy support; Hydrobiologia [838] 1-11
<https://doi.org/10.1007/s10750-019-03985-5>
- Schober, Bernhard; Hauer, Christoph; Habersack, Helmut (2020): Floodplain losses and increasing flood risk in the context of recent historic land use changes and settlement developments: Austrian case studies; Journal of Flood Risk Management [13] e12610
<https://doi.org/10.1111/jfr3.12610>
- Schuldt, Bernhard; Buras, Allan; Arend, Matthias; Vitasse, Yann; Beierkuhnlein, Carl; Damm, Alexander; Gharun, Mana et al (2020): A first assessment of the impact of the extreme 2018 summer drought on Central European forests; Basic and Applied Ecology [45] 86-103
<https://doi.org/10.1016/j.baae.2020.04.003>
<https://doi.org/10.1016/j.baae.2020.04.003>
- Seibert, Simon P.; Auerswald, Karl (2020): Hochwasserminderung im ländlichen Raum - Ein Handbuch zur quantitativen Planung - Abflusskonzentration - wie Abfluss in der Fläche gebündelt und beschleunigt wird; Springer Spektrum; München <https://doi.org/10.1007/978-3-662-61033-6>
- Seibert, Simon P.; Auerswald, Karl (2020): Hochwasserminderung im ländlichen Raum - Ein Handbuch zur quantitativen Planung - Abflusskonzentration - wie Abfluss in der Fläche gebündelt und beschleunigt wird; Springer Spektrum; München <https://doi.org/10.1007/978-3-662-61033-6>
- Semmelmayr, Katharina; Hackländer, Klaus (2020): Monitoring vertebrate abundance in Austria: developments over 30 years; Die Bodenkultur: Journal of Land Management, Food and

- Environment [71] 19-30
<https://doi.org/10.2478/boku-2020-0003>
- Shirokova, Vera; Likhacheva, Emma (2020):
 Historic Waterways - A route for international
 cooperation - Civilization and the great
 historical rivers in: International
 Multidisciplinary Scientific GeoConference :
 SGEM; Surveying Geology & Mining Ecology
 Management (SGEM); Sofia; 417-422
<https://doi.org/10.5593/sgem2020/5.1/s20.053>
- Slater, L.; Villarini, G.; Archfield, S.; Faulkner, D.;
 Lamb, R.; Khouakhi, A.; Yin, J. (2021): Global
 Changes in 20-Year, 50-Year, and 100-Year River
 Floods; Geophysical Research Letters [48 (6)]
 e2020GL091824
- Specht, Franz-Josef (2002): Einfluß von
 Gerinnebreite und Uferbewuchs auf die
 hydraulisch-sedimentologischen Verhältnisse
 naturnaher Fließgewässer; Fachbereich
 Bauingenieurwesen; TU Carolo-Wilhelmina;
 Braunschweig
- Stappen, Silke Barbara (2016): Streuobst als
 Objekt der Kulturlandschaftspflege; Rheinische
 Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn; ; Bonn
<https://hdl.handle.net/20.500.11811/6805>
- Statistik Austria: Bevölkerungsstand nach
 Bundesländern, Alter und Geschlecht vom
 11.08.2020;
https://www.statistik.at/wcm/idc/idcplg?IdcService=GET_NATIVE_FILE&RevisionSelectionMethod=LatestReleased&dDocName=022624;
 abgerufen am 2.4.2021
- Swain, D.L.; Wing, O.E.J.; Bates, P.D.; Done, J.M.;
 Johnson, K.A.; Cameron, D.R. (2020): Increased
 Flood Exposure Due to Climate Change and
 Population Growth in the United States; Earth's
 Future [8] e2020EF001778
<https://doi.org/10.1029/2020EF001778>
- Tappeiner, U; Tasser, E; Leitinger, G; Tappeiner, G
 (2006): Landnutzung in den Alpen: Historische
 Entwicklung und zukünftige Szenarien. in: Die
 Alpen im Jahr 2020. Alpine Space 1; Innsbruck
 University Press; Innsbruck; 21-39
https://www.academia.edu/download/42014766/Landnutzung_in_den_Alpen_historische_Ent20160203-18384-gzbwar.pdf
- Tasser, Erich; Tappeiner, Ulrike (2002): Impact of
 land use changes on mountain vegetation;
 Applied Vegetation Science [5 / 2] 173-184
<https://doi.org/10.1111/j.1654-109X.2002.tb00547.x>
- Teschke, U.; Pasche, E. (2004): A new approach for
 one-dimensional unsteady flow simulation in
 natural rivers with flood plains and vegetation
 in: Hydroinformatics; World Scientific
 Publishing; Singapore; 332-339
https://doi.org/10.1142/9789812702838_0041
- Thorne, C.R.; Lawson, E.C.; Ozawa, C.; Hamlin, S.L.;
 Smith, L.A. (2015): Overcoming uncertainty and
 barriers to adoption of Blue-Green
 Infrastructure for urban flood risk
 management; Journal of Flood Risk
 Management [11] 960-972
<https://doi.org/10.1111/jfr3.12218>
- Tockner Klement (2019): Vorwort in: Flüsse der
 Alpen; Muhar, Susanne; Muhar, Andreas; Egger,
 Gregory; Siegrist, Dominik; Haupt - Bern; 7
- Tockner, Klement; Stanford, Jack A. (2002): Riverine
 flood plains: present state and future trends;
 Foundation for Environmental Conservation
 [29] 308-330
<https://doi.org/10.1017/S037689290200022X>
- UBA Umweltbundesamt (2019): Bodenverbrauch
 in Österreich - Status quo Bericht zur Reduktion
 des Bodenverbrauchs in Österreich; BMNT -
 Bundesministerium für Nachhaltigkeit und
 Tourismus, Sektion VII Tourismus und
 Regionalpolitik; Stubenring 1 - Wien
<https://info.bmlrt.gv.at/dam/jcr:0d5df73f-114b-447d-8186-cbf0d68fbc3e/Studie%20UBA%20Bodenverbrauch.pdf>
- UBA Umweltbundesamt GmbH:
 Flächeninanspruchnahme;
<https://www.umweltbundesamt.at/umweltthemen/boden/flaecheninanspruchnahme>;
 aufgerufen am 15.01.2022
- Uehlinger, Urs; Wantzen, Karl M.; Leuven, Rob
 S.E.W.; Arndt, Hartmut (2009): The Rhine River
 Basin in: Rivers of Europe; Academic Press;
 London - Burlington - San Diego; 199-245
[./ISBN%20978-0-12-369449-2](https://doi.org/10.1017/S037689290200022X)
- Umweltverband WWF Österreich: Bundesländer
 im Bodencheck - Regional-Analyse des

- Flächenfraßes 2021; <https://www.wwf.at/wp-content/uploads/2021/10/2021-10-07-WWF-Analyse-Bundeslaender-im-Boden-Check-final-1.pdf>; Abgerufen am 12.12.2021
- Vetter, Simon (2014): Zur Zukunft des temporären Siedlungsraumes in den Alpen : Fallstudie zur Maisässlanschaft im Montafon; Department für Raum, Landschaft und Infrastruktur (RALI) / Institut für Raumplanung, ländliche Neuordnung (IRUB); University for Natural Resources and Life Sciences; Vienna
- Vörösmarty, C.J.; McIntyre, P.B.; Gessner, M.O.; Dudgeon, D.; Prusevich, A.; Green, P.; Glidden, S.; Bunn, S.E.; Sullivan, C.A.; Reidy Liermann, C.; Davies, P.M. (2010): Global threats to human water security and river biodiversity; Nature [467] 555-561
<https://doi.org/10.1038/nature09440>
- VOWIS - Amt der Vorarlberger Landesregierung - Abteilung Wasserwirtschaft: Abfluss - Stationsdaten;
<https://vowis.vorarlberg.at/abfluss>; abgerufen am 10.12.2020
- Walsh, Christopher; Fletcher, Tim D.; Ladson, Anthony R. (2005): Stream restoration in urban catchments through redesigning stormwater systems: looking to the catchment to save the stream; Journal of the North American Benthological Society [24-3] 690-705
- Wang, Jiamin; Guan, Yuping; Wu, Lixin; Guan, Xiaodan; Cai, Wenju; Huang, Jianping; Dong, Wenjie; Zhang, Banglin (2021): Changing Lengths of the Four Seasons by Global Warming; Geophysical Research Letters [48] e2020GL091753
<https://doi.org/10.1029/2020GL091753>
- Wang, M.; Chen, Y.F.; Ma, G.Q.; Zhou, J.Q.; Zhou, C.B. (2016): Influence of surface roughness on nonlinear flow behaviors in 3D self-affine rough fractures: Lattice Boltzmann simulations; Advances in Water Resources [96] 373-388
<https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.08.006>
- Weather, Howard; Evans, Edward (2009): Land use, water management and future flood risk; Land Use Policy [26] 251-264
- Weingartner, Rolf; Fürst, Josef; Schulz, Karsten (2019): Hydrologie - Die Alpen als Wasserturm Europas in: Flüsse der Alpen; Muhar, Susanne; Muhar, Andreas; Egger, Gregory; Siegrist, Dominik; Haupt - Bern; 56-73
- Wikipedia: Silvretta Stausee;
<https://de.wikipedia.org/wiki/Silvretta-Stausee>; abgerufen am 30.1.2021
- Williams, Hanna; Colombi, Tino; Keller, Thomas (2020): The influence of soil management on soil health: An on-farm study in southern Sweden; Geoderma [360] 114010
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114010>
- Wohl, Ellen (2019): Forgotten Legacies: Understanding and Mitigating Historical Human Alterations of River Corridors; Water Resources Research [55] 5181-5201
<https://doi.org/10.1029/2018WR024433>
- Wood, J.L.; Harrison, S.; Reinhardt, L.; Taylor, F.E. (2020): Landslide databases for climate change detection and attribution; Geomorphology [355]
- Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V.; Zhai, P., Pirani, A.; Connors, S.L.; Péan, C.; Berger, S.; Caud, N.; Chen, Y.; Goldfarb, L.; Gomis, M.I.; Huang, M.; Leitzell, K.; Lonnoy, E.; Matthews, J.B.R.; Maycock, T.K.; Waterfield, T.; Yelekçi, O.; Yu, R.; Zhou, B. eds.] (2021): The Physical Science Basis; Cambridge University Press; UK
<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- WWF - Grooten, M. and Almond, R.E.A. (eds) (2018): Living Planet Report - 2018: Aiming Higher; World Wildlife Fund; Gland Switzerland
https://www.wwf.org.uk/sites/default/files/2018-10/wwfintl_livingplanet_full.pdf
- WWF - World Wildlife Fund: Bodenverbrauch fast dreimal so stark gestiegen wie Bevölkerungswachstum;
<https://www.wwf.at/wwf-bodenverbrauch-fast-dreimal-so-stark-gestiegen-wie-bevoelkerungswachstum/>; Abgerufen am 12.12.2021
- WWF - World Wildlife Fund: Species directory;
https://www.worldwildlife.org/species/directory?sort=extinction_status&direction=desc; abgerufen am 19.3.2021
- WWF - World Wildlife Fund: 2022 wird das Jahr des Bodenschutzes; <https://www.wwf.at/wwf-2022->

[wird-jahr-des-bodenschutzes/](#); Abgerufen am 15.01.2022

Zemp, Michael; Frey, Holger; Gärtner-Roer, Isabelle; Nussbaumer, Samuel U.; Hoelzle, Martin; Paul, Frank; Haerberli, Wilfried; Denzinger, Florian; Ahlstrøm, Andreas P.; Anderson, Brian; Samjwal, Bajracharya; Baroni, Carlo; Braun, Ludwig N.; Cáceres, Bolívar E.; Casassa, Gino; Cobos, Guillermo; Dávila, Luzmila R.; Delgado Granados, Hugo; Demuth, Michael N.; Espizua, Lydia; Fischer, Andrea; Fujita, Koji; Gadek, Bogdan; Ghazanfar, Ali; Hagen, Jan Ove; Holmlund, Per; Karimi, Neamat; Li, Zhongqin; Pelto, Mauri; Pitte, Pierre; Popovnin, Victor V.; Portocarrero, Cesar A.; Prinz, Rainer; Sangewar, Chandrashekar V.; Severskiy, Igor; Sigurdsson, Oddur; Soruco, Alvaro; Usabaliev, Ryskul; Vincent, Christian (2015): Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st century; Journal of Glaciology [61] 745-762
<https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/2F1E3ACB111A03F9BA83D11439F5D681/S0022143000202554a.pdf/div-class-title-historically-unprecedented-global-glacier-decline-in-the-early-21st-century-div.pdf>

Zemp, Michael; Haerberli, W (2007): - Glaciers and ice caps. Part I: Global overview and outlook. Part II: Glacier changes around the world.;

UNEP; Nairobi <https://doi.org/10.5167/uzh-40427>

Zerbe, Stefan (2019): Fließgewässer in: Renaturierung von Ökosystemen im Spannungsfeld von Mensch und Umwelt; Springer Spektrum; Berlin, Heidelberg; 209-233
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-58650-1>

Zhang, Sheng-tang; Liu, Yin; Li, Miao-miao; Liang, Bo (2016): Distributed hydrological models for addressing effects of spatial variability of roughness on overland flow; Water Science and Engineering [9] 249-255
<https://doi.org/10.1016/j.wse.2016.07.001>

Zhou, Shijie; Smith, Anthony DM; Knudsen, Eric (2014): Ending overfishing while catching more fish; Fish and Fisheries [16] 716-722

Zimmermann, Patrick; Tasser, Erich; Leitinger, Georg, Tappeiner, Ulrike (2010): Effects of land-use and land-cover pattern on landscape-scale biodiversity in the European Alps; Agriculture, Ecosystems and Environment [139] 13-22
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.06.010>

Zuluaga, Santiago; Karney, Bryan W.; Saxe, Shoshanna (2021): The concept of value in sustainable infrastructure systems: a literature review; Environmental Research: Infrastructure and Sustainability [022001]
<https://doi.org/10.1088/2634-4505/ac0f32>