
VERÄNDERUNG DER LANDBEDECKUNG IM EINZUGSGEBIET DER MITTLEREN SALZACH IN SALZBURG

Masterarbeit

Leena Rapottnig, 01204189

Betreut von

Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Severin Hohensinner

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Susanne Muhar



Universität für Bodenkultur

Wien, Mai 2021

Ich erkläre eidesstattlich, dass ich die Arbeit selbständig angefertigt, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt und alle aus ungedruckten Quellen, gedruckter Literatur oder aus dem Internet im Wortlaut oder im wesentlichen Inhalt übernommenen Formulierungen und Konzepte gemäß den Richtlinien wissenschaftlicher Arbeiten zitiert, durch Fußnoten gekennzeichnet bzw. mit genauer Quellenangabe kenntlich gemacht habe.

Leena Rapottnig

ABSTRACT

Durch die jahrtausendelange Veränderung der Landbedeckung durch die Menschen wurden die Umwelt und ihre Ökosystemleistungen erheblich verändert. Diese Masterarbeit befasst sich mit der Veränderung der Landbedeckung im Einzugsgebiet der Mittleren Salzach zwischen dem Gasteinertal und Salzburg zwischen 1830 und 2016. Ein besonderes Augenmerk wurde dabei auf die Überflutungsgebiete 300-jährlicher Hochwässer gelegt. Dies ermöglicht es, Aussagen in Hinblick auf Hochwasserrisiken an alpinen Tallagen zu treffen. Dafür wurde der Franziszeische Kataster von 1830 digitalisiert und mit der gegenwärtigen Landbedeckung GIS-gestützt verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass Ödland / unbewachsene Felsen und Schuttflächen (- 35 %), Fließgewässerflächen (- 45 %), (Obst-)Baumwiesen (- 59 %), Gletscherflächen (- 86 %), Ackerflächen (-96 %), und größere Feuchtgebiete (-99,96 %) zurückgingen. Weiters verzeichneten Wälder (+ 15 %), stehende Gewässer (+ 46 %), Grünland (+ 147 %) und Siedlungsflächen (+ 490 %) einen Zuwachs. Im Unterschied zum Gesamtgebiet wurde in den Überflutungsbereichen der 300-jährlichen Hochwässer ein stärkerer Rückgang der (Obst-)Baumwiesen (- 81 %), ein Rückgang der Waldflächen (- 14 %), das Verschwinden von größeren, historisch ausgewiesenen Feuchtgebieten (- 100 %) und ein massiver Zuwachs an Siedlungsgebieten (+ 850 %) festgestellt. Die vielen Effekte dieser Veränderungen legen den Schluss nahe, dass sich die Hochwassergefahr in alpinen Tallagen der Mittleren Salzach seit Beginn des 19. Jahrhunderts aufgrund veränderter Landbedeckung, Regulierungen und Schutzwasserbauten erhöht hat. Der Einfluss des Klimawandels auf das alpine Hochwasserregime ist nach wie vor Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen.

SCHLAGWORTE: Landbedeckung, Landnutzung, Salzburg, Salzach, Abfluss, Hochwasser, historisch, GIS

Due to thousands of years of land cover change by humans, the environment and its ecosystem services have been significantly altered. This master thesis deals with the change in land cover in the catchment area of the Middle Salzach River between the Gastein Valley and Salzburg between 1830 and 2016. Special attention was paid to the floodplains of 300-year floods. This enables statements with regard to flood risks at alpine valleys. For this purpose, the Franziscean Cadastre of 1830 was digitised and compared with the current land cover using GIS. The results show that wasteland / unvegetated rock and debris areas (- 35 %), running water areas (- 45 %), sparsely wooded areas (- 59 %), glaciers (- 86 %), arable land (-96 %), and bigger wetlands (-99.96 %) decreased. In addition, forests (+ 15 %), stagnant waters (+ 46 %), grassland (+ 147 %) and settlement areas (+ 490 %) increased. In contrast to the studied catchment, in the inundation areas of the 300-year floods a greater decrease in sparsely wooded areas (- 81 %), a decrease in forest areas (- 14 %), the disappearance of bigger, historically documented wetlands (- 100 %) and a massive increase in settlement areas (+ 850 %) were recorded. The many effects of these changes suggest that the flood risk in alpine valleys of the Middle Salzach has increased since the beginning of the 19th century due to changes in land cover, channelisation and flood protection structures. The influence of climate change on the alpine flood regime is still the subject of scientific research.

KEYWORDS: land cover, land use, Salzburg, Salzach, runoff, floods, historical, GIS

INHALTSVERZEICHNIS

ABSTRACT	3
INHALTSVERZEICHNIS	4
1 EINLEITUNG	6
1.1 LANDBEDECKUNG/LANDNUTZUNG UND IHR EINFLUSS	6
1.2 VERWANDTE FORSCHUNG	8
1.3 PoCo FLOOD	10
2 ZIELSETZUNG, FORSCHUNGSFRAGEN UND HYPOTHESEN	11
3 STUDIENGEBIET	13
4 DATENQUELLEN UND MATERIAL	16
5 METHODIK	18
5.1 LANDBEDECKUNGSKARTEN	18
5.2 HOCHWASSERÜBERFLUTUNGSFLÄCHEN	21
5.3 FLÄCHENAUSWERTUNG	22
6 ERGEBNISSE	24
6.1 EINZUGSGEBIET	24
6.2 ÜBERFLUTUNGSGEBIETE	28
6.3 VERGLEICH VON EINZUGSGEBIET UND ÜBERFLUTUNGSGEBIETEN	32
6.4 TRANSFORMATIONEN DER LANDBEDECKUNG	33
7 DISKUSSION	36
7.1 METHODISCHE UNGENAUIGKEITEN UND INTERPRETATIONSSCHWIERIGKEITEN	36
7.2 ÜBERPRÜFUNG DER HYPOTHESEN	37
7.3 FOLGEN DER LANDBEDECKUNGSÄNDERUNGEN FÜR ABFLUSSPROZESSE	39

<u>8</u>	ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN	43
<u>9</u>	LITERATURVERZEICHNIS	45
<u>10</u>	ABBILDUNGS- UND TABELLENVERZEICHNIS	51
<u>11</u>	ANHANG	52

1 EINLEITUNG

1.1 LANDBEDECKUNG/LANDNUTZUNG UND IHR EINFLUSS

Die Menschheit und ihre Umwelt sind laufender Veränderung ausgesetzt. In historischen Vergleichen können die unterschiedlichen Zustände von „damals“ und „heute“ sichtbar gemacht werden. Analysen, die die Umwelt der Menschen betreffen, können mit Fokus auf verschiedene Parameter durchgeführt werden. Einer dieser Parameter ist die Betrachtung von Landnutzung oder Landbedeckung.

Obwohl Landnutzung oft als Überbegriff für Landnutzung und Landbedeckung verwendet wird, sind dies unterschiedliche Begriffe, die jedoch miteinander zusammenhängen. Die Landnutzung beschreibt die Verwendung des Landes durch den Menschen, also den sozio-ökonomischen Blickwinkel auf die Landschaft. Die Landbedeckung charakterisiert lediglich die Erscheinungsform der Erdoberfläche, also den beobachteten (bio-) physischen Zustand der Bedeckung, unabhängig von der anthropogenen Verwendung (Niehoff 2002, Probeck et al. 2006, Arnold et al. 2017).

Veränderungen in Landnutzung und Landbedeckung, die oft von institutionellen Faktoren wie Gesetzgebung und Eigentumsrechte beeinflusst werden (Gingrich et al. 2012), zeigen nicht nur sozial-gesellschaftliche Prozesse auf, sondern wirken sich auch auf die Umwelt aus. So können massive Veränderungen der Landnutzung durch Veränderungen der Vegetation starke Auswirkungen auf die Biodiversität aufweisen, unter anderem da homogenere Landschaften zu Biodiversitätsverlust führen und Siedlungserweiterungen Lebensräume verkleinern (Grêt-Regamey et al. 2008, Egarter Vigl et al. 2016, Tappeiner et al. 2020).

Landnutzungsänderungen beeinflussen auch Wasser- und Kohlenstoffkreisläufe, und somit die Ökosystemdienstleistungen einer Landschaft. Ökosystemdienstleistungen umfassen (a) Versorgungsleistungen/Produktion (Nutzpflanzen, Ernte und Saatgut); (b) Regulierende Leistungen (Klimaregulierung und Bodenerosionskontrolle); und (c) Kulturelle Leistungen (ästhetischer Wert) (Wolf et al. 2012, Egarter Vigl et al. 2016, Tappeiner et al. 2020).

Besonders im Bereich regulierender Leistungen der Umwelt können Landbedeckungsänderungen weitreichende Folgen haben. So ändern sich mit der Landnutzung und Landbedeckung etwa die Erosionseigenschaften. Wälder, zum Beispiel, schützen vor Bodenerosion und Sedimenttransport bei Niederschlagsereignissen unterschiedlichen Ausmaßes. Entwaldung oder Umwandlung von Wald in Acker- oder Grünland führt daher zu verstärkten Erosionsprozessen (Haidvogel 2008, Bathurst et al. 2011, Rogger et al. 2017).

Auch bei kleinklimatischer Temperaturentwicklung kann die Landbedeckung eine wesentliche Rolle spielen (Mutibwa et al. 2014). Die höheren Temperaturen in städtischen Umgebungen sind unter dem Begriff „Urban Heat Islands“ ausgiebig erforscht (Doussat & Gourmelon 2003, Smith et al. 2005, Silva et al. 2018). Im Gegenzug dazu herrschen auf stärker bewachsenen Flächen, wie Wäldern, und nahe Gewässern kühlere Temperaturen vor (Sun et al. 2012, Feizizadeh et al. 2013).

Ein besonderes Augenmerk soll in dieser Arbeit auf den Zusammenhang von Landbedeckung und Abflussverhalten sowie Hochwasser liegen. Die Landbedeckung beeinflusst die Abflussbildung auf drei Arten: 1) Bedeckung des Landes und deren Einfluss auf die oberirdische Speicherung von Wasser (Interzeption, Streuspeicherung und Benetzung der Bodenoberfläche); 2) Bodenoberfläche und deren Infiltrationseigenschaften; 3) Bodeneigenschaften in Bezug auf Infiltration und Bodenwasserbewegung (Niehoff 2002). Besonders hervorzuheben ist hierbei die anfängliche Bodenfeuchte vor einem Niederschlagsereignis, da die anfängliche Bodenfeuchte in allen Fällen wichtig für den Spitzenabfluss ist (Grillakis et al. 2016).

Bezogen auf oberirdische Wasserspeicherungen hat Waldbedeckung infolge erhöhter Interzeption von Niederschlägen und der hohen Transpiration in Wäldern zumeist eine abflussschwächende Wirkung, da die anfängliche Bodenfeuchte verringert wird (Niehoff 2002, Blöschl et al. 2015, Rogger et al. 2017). Bewaldete Gebiete weisen oft auch eine erhöhte Infiltrationsrate auf, da die Bearbeitungsintensität meist gering ist und grobe Holzwurzeln von Bäumen bevorzugte Fließwege im Boden (sogenannte Makroporen) schaffen, die den schnellen Wasserfluss von der Oberfläche in den Untergrund verstärken und so die Grundwasserspeicher auffüllen (Niehoff 2002, Blöschl et al. 2015).

Intensive landwirtschaftliche Produktion (Ackerbau oder Weidewirtschaft) mit Einsatz von schweren Maschinen kann zu einer Verringerung der Bodeninfiltrationsraten und der verfügbaren Speicherkapazitäten führen, da die Filter- und Pufferprozessen in tieferen Bodenhorizonten reduziert werden und dichte Bodenhorizonte gebildet werden können, die die vertikale Infiltration in den Boden verringern oder verzögern können (Wheater & Evans 2009, Rogger et al. 2017).

Die städtische Umgebung beeinflusst Abflüsse durch undurchlässige Oberflächen, die den Überlandabfluss erhöhen und die Infiltration verringern. Das Ergebnis ist ein größeres Abflussvolumen, das sich in kürzerer Zeit entlädt und potenziell zu dramatisch erhöhten Hochwasserspitzen führt, aber auch zu geringeren Niedrigwasserabflüssen und einer geringeren Grundwasserneubildung (Wheater & Evans 2009, Blöschl et al. 2015, De Niel & Willems 2019).

Gletscher beeinflussen den Abfluss durch die zwischenzeitliche Speicherung und spätere Freisetzung von Niederschlägen. Besonders in den trockenen Sommermonaten trägt das Schmelzwasser zur Abflussbildung bei (Jansson et al. 2003, Huss 2011, Carnahan et al. 2019).

Durch Bodenfeuchte, Infiltration, Wasserrückhalt und Oberflächenabfluss beeinflussen verschiedene Landbedeckungsarten also das Abflussgeschehen. Doch auch Niederschläge, Lufttemperaturen und die Größe des Einzugsgebiets spielen wichtige Rollen bei der Entstehung von Hochwässern und deren Größenordnung (Brown et al. 2005, Gaál et al. 2012, Grillakis et al. 2016). Die Interaktion der vielen verschiedenen hochwasserbeeinflussenden Faktoren hängen stark von den strukturellen und ökologischen Rahmenbedingungen ab, die durch sozioökonomische und klimatische Entwicklungen bestimmt werden (Briner et al. 2013b). Daher erhalten Studien, die die Auswirkungen von Landnutzungsänderungen auf Abflüsse und Überschwemmungen untersuchen, oft widersprüchliche Ergebnisse für die gleiche Art von Änderungen, die den studienspezifischen Perspektiven geschuldet sind (Rogger et al. 2017). So könnte die Größe des Studiengebiets

eine wesentliche Rolle spielen, wobei bei kleineren Einzugsgebieten die Landnutzung eine stärkere Bedeutung hat, in größeren Gebieten könnten sich wiederum gegenteilige Effekte verschiedener Landbedeckungstypen aufheben (Merz & Blöschl 2009, Yang et al. 2015).

Das Verhältnis von Landnutzung und Klimawandel in Bezug auf das Abflussgeschehen ist ebenfalls noch nicht eindeutig geklärt. Ob Hochwasserereignisse 1) nur Manifestationen der natürlichen Klimavariabilität, 2) das Ergebnis von Veränderungen der Landnutzung und der Flussregulierung, oder 3) Indikatoren der Auswirkungen der jüngsten globalen Erwärmung sind kann mit heutigem Wissen nicht allgemein und universell beantwortet werden (Bronstert et al. 2002, Brázdil et al. 2010). Erschwerend kommt dabei hinzu, dass der Zusammenhang zwischen Hochwasser und Klimawandel schwieriger zu erkennen ist, wenn die Einzugsgebiete anthropogen verändert wurden, sodass Zuordnung zu einem einzelnen Einflussfaktor ungewiss ist (Hodgkins et al. 2017). Mit zunehmender Länge des Untersuchungszeitraums steigt wiederum die Wahrscheinlichkeit, dass die Beschleunigung der Erosions- und Abflussprozesse die kumulative Wirkung sowohl der Landnutzung als auch der klimatischen Einflüsse widerspiegelt (Brierley & Stankoviansky 2003). Weitere Forschung auf dem Gebiet der historischen Landbedeckungsentwicklung ist demnach vonnöten.

1.2 VERWANDTE FORSCHUNG

Rekonstruktionen von historischen Landnutzungen im Bereich der Alpen und darauf basierende Auswertungen wurden bereits in einigen Arbeiten behandelt. So konnten Jepsen et al. (2015) feststellen, dass in den letzten 150 Jahren eine drastische Intensivierung der Landnutzung stattgefunden hat, die in Europa in mehreren Etappen von der Ära der Bauernschaft – mit feudalen Strukturen, geringem technologischen Input und Subsistenzwirtschaft – über die Einführung von Rechten für Bauern und Privatisierungen bis hin zu Intensivierung und schließlich zur Bildung von Umweltbewusstsein in der Landwirtschaft geführt hat (Jepsen et al. 2015). Egarter Vigl et al. (2016), die acht Studiengebiete in den Alpen verglichen, bestätigen im Allgemeinen landwirtschaftliche Intensivierungsprozesse auf fruchtbaren Talböden und an leicht zugänglichen Standorten in Hanglagen. Sie weisen darauf hin, dass Obst- und Getreideanbau die Landschaften in tieferen Lagen dominieren, während auf produktiven Flächen in höheren Lagen Wiesen und Weiden üblich sind (Egarter Vigl et al. 2016). Laut Tasser et al. (2017), die ein Gebiet in den Zentralalpen untersuchten, wurde von 1860 bis heute in bevorzugten Lagen im Talboden sehr wenig Fläche aufgegeben, dafür fanden aber bedeutende Veränderungen in der Landbewirtschaftung statt. Während der Ackerbau in diesen Gebieten im 19. Jahrhundert dominierte, wurde er ab der Mitte des 20. Jahrhunderts reduziert und durch Grasland, Siedlungen und Gewerbegebiete und Wälder ersetzt. Insgesamt nahm die landwirtschaftlich genutzte Fläche seit 1860 jedoch ab, was hauptsächlich als Folge der Aufgabe extensiv genutzter Bergweiden zu verstehen ist (Tasser et al. 2017).

Tasser et al. (2007) fanden, dass in den letzten 150 Jahren in allen von ihnen untersuchten Agrarstrukturregionen der östlichen Zentralalpen Flächen aufgegeben wurden. Im Schnitt wurden rund 20 %, in einigen Gebieten sogar bis zu 70 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche der Alpen aufgegeben. Bei den aufgegebenen Flächen handelt es sich meist um ehemalige traditionelle Landnutzungstypen wie Lärchenwiesen, die weniger intensiv genutzten Wiesen des subalpinen und alpinen Gürtels sowie die unzugänglichen und steilen Gebiete. In der Folge hat sich die Waldfläche fast verdoppelt. Siedlungen expandierten vor allem auf Kosten der intensiv genutzten Flächen

mit günstigen natürlichen Standortbedingungen, wie Talböden und definierten sanfteren Hängen (Tasser et al. 2007).

Mehrere Studien beschäftigen sich mit der Zunahme von Waldflächen. Der Waldzuwachs in den letzten 150 Jahren vollzog sich weitgehend auf ungünstigen Standorten, wie ehemaligen Almweiden, Flächen mit Gras- und Gestrüppvegetation und landwirtschaftlichen Flächen mit Baumgruppen in mittleren bis hohen Lagen, steilen Hängen, steinigem Boden und einer niedrigen Temperatursumme (Gellrich et al. 2007, Tasser et al. 2007, Egarter Vigl et al. 2016).

Im Gegensatz dazu gehen Gletscher weltweit, und auch im Alpenraum, seit Jahrzehnten zurück (Dyurgerov & Meier 2005, Oerlemans 2005, Beniston & Stoffel 2014). In den Alpen wurden sie vermehrt durch Grünland ersetzt (Tasser et al. 2017).

Ein Rückgang der Feuchtgebiete konnte ebenfalls großräumig beobachtet werden. In ganz Mitteleuropa wurden in den letzten Jahrhunderten riesige Feuchtgebiete in landwirtschaftliche Nutzflächen umgewandelt (Gimmi et al. 2011). Auch in Österreich führte zwischen den 1950ern und 1970ern der Flächenbedarf für die angestrebte autarke Nahrungsmittelproduktion nach dem zweiten Weltkrieg zum Schlagwort des "zehnten Bundeslandes", das durch Regulierung und Entwässerung an Gewässern und in Feuchtgebieten geschaffen wurde (Haidvogel et al. 2018).

Die Zunahme von Siedlungsgebieten, meist auf Kosten der Grünlandnutzung, wurde mehrfach dokumentiert. Mitte des 19. Jahrhunderts dominierte in den Alpen die Grünlandnutzung, in günstig gelegenen Bereichen mitunter auch die Ackernutzung. Ende des 20. Jahrhunderts war ein großer Teil der Ackerflächen durch Siedlungen und Grünland ersetzt worden (Tappeiner et al. 2020). Diese kontinuierliche Zunahme der Siedlungsfläche war auch in den letzten Jahren des 20. Jahrhunderts zu beobachten (Egarter Vigl et al. 2016). Im Zeitraum 1980-2000 wurde ein starker Rückgang der Wiesen in den Alpen festgestellt. Dies geschah vor dem Hintergrund abnehmender landwirtschaftlicher Nutzflächen und zunehmender Besiedlung (Monteiro et al. 2011).

Die Zunahme von Siedlungsflächen und Veränderung des Siedlungsverhaltens brachten Haidvogel (2008) und Haidvogel et al. (2018) in Zusammenhang mit Überflutungen und Hochwasserschutz. Da Überschwemmungen ein häufiger Begleiter historischer Gesellschaften waren, befanden sich Siedlungsgebiete meist in flussferneren Bereichen. Bis ins 20. Jahrhundert wurden die Flächen direkt neben den Flüssen, die auch bei kleinen Hochwässern überflutet wurden, hauptsächlich land- und forstwirtschaftlich genutzt. Durch die wirtschaftlichen und demographischen Veränderungen, die im 19. Jahrhundert angingen und sich ins 20. und 21. Jahrhundert fortsetzten, wuchs der Bedarf an leicht nutzbarer Fläche. Durch den Fortschritt im technischen Hochwasserschutz sowie die langen Phasen ohne große Hochwässer im 20. Jahrhundert wurde die Besiedlung und Nutzung von Flussauen zu einem scheinbar risikolosen Unterfangen (Haidvogel 2008, Haidvogel et al. 2018).

1.3 PoCo FLOOD

In den letzten Jahrzehnten nahm jedoch der Umfang und die Schwere von Hochwässern zu. Zusätzlich zu dem steigenden Wohlstand in hochwassergefährdeten Gebieten führte diese Entwicklung zu erheblich gestiegenen Hochwasserschäden in Europa (Kundzewicz et al. 2016). Zwar konnten Blöschl et al. (2015) zeigen, dass Hochwässer in der Vergangenheit meist nicht gleichmäßig verteilt auftraten, sondern in Clustern oder Perioden die besonders anfällig für Hochwässer waren, was zu hochwasserreichen und hochwasserarmen Perioden führte. Doch die letzten drei Jahrzehnte gehörten zu den hochwasserreichsten Perioden Europas in den letzten 500 Jahren, und dieser Zeitraum unterscheidet sich von anderen hochwasserreichen Perioden in Bezug auf seine Ausdehnung, Lufttemperaturen und Hochwassersaisonalität. In den meisten Teilen Europas traten frühere überschwemmungsreiche Perioden in Phasen auf, in denen es kühler als gewöhnlich war, die gegenwärtige überschwemmungsreiche Periode ist jedoch viel wärmer als gewöhnlich. Die neun ermittelten überschwemmungsreichen Perioden sind zeitlich relativ gleichmäßig verteilt, aber die letzte 30-Jahres-Periode ist von den vergangenen Perioden durch eine 90-jährige Katastrophenlücke getrennt (Blöschl et al. 2020).

Die uneindeutigen Datenlage in Bezug auf die Einflussfaktoren von Hochwasserbildung und die Aktualität verdeutlichen das dringende Forschungspotential in Bezug auf Hochwässer, deren Entstehung und das damit verbundene Flussgebietsmanagement. Im Forschungsprojekt PoCo-FLOOD werden Interdependenzen, Konflikte und Möglichkeiten der Politikkoordination zwischen den Sektoren Hochwasserschutz, Wasserkraft (Energie), Landwirtschaft und Raumplanung untersucht. Das Projekt strebt seine Ziele durch einen kombinierten Forschungsansatz an, der auf interdisziplinärer Forschung und der Einbeziehung von Interessenvertretern basiert. Das interdisziplinäre Forschungsteam vereint fünf wissenschaftliche Disziplinen, die für das Forschungsthema von großer Bedeutung sind: Raumplanung und Landumgestaltung, Hydrologie und Wassermanagement, Landwirtschaft, Flussmorphologie und Politikwissenschaft (Löschner et al. 2019b).

Die vorliegende Masterarbeit ist innerhalb von PoCo-Flood Teil des Arbeitspakets zur Rekonstruktion der historischen Landnutzung und Landbedeckung (Arbeitspaket 2) sowie Teil des Arbeitspakets zur GIS-gestützten Analyse der Bewertung von Veränderungen der Landnutzung/Bodenbedeckung (Arbeitspakete 3 bis 5). Im Zuge des Arbeitspakets 2 werden die historische Landbedeckung und die menschliche Landnutzung für die Einzugsgebiete der Salzach, des Rheins und der Drau im Alpenraum Österreichs auf der Grundlage historischer Karten, insbesondere des Franziszeischen Katasters (aus den Jahren 1817-1861) rekonstruiert, um den langfristigen Veränderungen in Flusslandschaften Rechnung zu tragen. Bisher wurde eine derart großflächig und detailliert angelegte Rekonstruktion der historischen Landnutzungen noch nicht vorgenommen. Die Arbeitspakete 3 bis 5 beinhalten u.a. GIS-gestützte Analyseverfahren zur Bewertung von Veränderungen der Landnutzung und Bodenbedeckung im Hinblick auf potenzielle Veränderungen des natürlichen Wasserrückhalts in den Oberlaufeneinzugsgebieten; ebenso die Beurteilung der Hochwassergefahrenexposition von Landwirtschaft und Siedlung für das gesamte österreichische Gebiet (Löschner et al. 2019a).

2 ZIELSETZUNG, FORSCHUNGSFRAGEN UND HYPOTHESEN

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Rekonstruktion der historischen Landbedeckung, der GIS-gestützten Ausweisung der gegenwärtigen Landbedeckung und der vergleichenden Analyse dieser beiden Datensätze. Darauf aufbauend sollen Rückschlüsse auf potenzielle, durch Landnutzungsänderungen hervorgerufene Einflüsse auf das Hochwasserrisiko in alpinen Tallagen gezogen werden. Als Untersuchungsgebiet dient hierbei das Einzugsgebiet der Mittleren Salzach in Salzburg. Im Zuge dessen sollen zwei Forschungsfragen im Detail beantwortet werden:

- F1 Wie hat sich die Landbedeckung bzw. Landnutzung im gesamten untersuchten Einzugsgebiet der Mittleren Salzach zwischen dem Gasteinertal und Salzburg im Zeitraum zwischen 1830 und 2016 verändert?*
- F2 Welche Unterschiede in der Veränderung der Landbedeckung gibt es zwischen dem Einzugsgebiet der Mittleren Salzach und den Überflutungsgebieten 300-jährlicher Hochwässer?*

Die oben erwähnten Arbeiten (siehe Kapitel 1.2) beschäftigen sich mit ähnlichen Fragen und liefern daher Anhaltspunkte, welche Prozesse zu erwarten sind. Generell fand eine Intensivierung der Landwirtschaft statt (Jepsen et al. 2015, Egarter Vigl et al. 2016), wobei auch Feuchtgebiete in Ackerflächen umgewandelt wurden (Wheater & Evans 2009, Gimmi et al. 2011, Haidvogel et al. 2018). Parallel dazu wurden viele Ackerflächen in günstig gelegenen Talräumen aufgegeben (Tasser et al. 2007, Tasser et al. 2017). Dies steht oft im Zusammenhang mit einem generellen Zuwachs an Siedlungsfläche, der meist in Talsohlen erfolgte (Tasser et al. 2007, Haidvogel 2008, Tasser et al. 2017). Waldflächen nahmen oft ebenfalls zu, besonders an Stellen ehemaliger Weiden oder Flächen mit Baumgruppen (Gellrich et al. 2007, Tasser et al. 2007, Egarter Vigl et al. 2016). Im Gegensatz dazu gehen Gletscherflächen seit Jahrzehnten zurück (Dyurgerov & Meier 2005, Oerlemans 2005, Beniston & Stoffel 2014). Fließgewässer wurden seit dem 19. Jahrhundert reguliert und kanalisiert (Haidvogel 2008, Haidvogel et al. 2018, Hein et al. 2019). Bezogen auf diesen Erkenntnissen wurden folgende Hypothesen formuliert:

- H1 Im gesamten untersuchten Einzugsgebiet der Mittleren Salzach zwischen dem Gasteinertal und Salzburg ist zu erwarten, dass folgende Landbedeckungsänderungen von 1830 bis 2016 auftreten:*
 - a) Rückgang der Ackerflächen*
 - b) Rückgang der Feuchtgebiete*
 - c) Rückgang der (Obst-)Baumwiesen*
 - d) Rückgang der Fließgewässerflächen*
 - e) Starker Rückgang der Gletscher*
 - f) Zunahme an Waldflächen*

g) Zunahme an Siedlungsflächen

H2 Folgende Veränderung der Landbedeckung sind in den Überflutungsgebieten 300-jährlicher Hochwässer im Unterschied zum Einzugsgebiet der Mittleren Salzach zu erwarten:

a) Ausgeprägterer Rückgang von Ackerflächen

b) Ausgeprägterer Rückgang von Feuchtgebieten

c) Ausgeprägterer Rückgang von (Obst-)Baumwiesen

d) Stärkerer Zuwachs von Siedlungsgebieten

Diese erwarteten Landbedeckungsveränderungen können in der Folge auch Auswirkungen auf das Abflussgeschehen und das Hochwasserrisiko haben (Brázdil et al. 2010, Rogger et al. 2017). Einerseits würden der Rückgang von Ackerflächen, die durch geringere Infiltrationsraten den Oberflächenabfluss erhöhen (Wheater & Evans 2009, Rogger et al. 2017), und die Zunahme von Waldflächen, die erhöhte Infiltration und hohe Transpirations- und Interzeptionsraten aufweisen (Niehoff 2002, Blöschl et al. 2015), tendenziell abflussreduzierend wirken. Andererseits würde der Rückgang der Gletscher, die Niederschlagsspeicher sind (Jansson et al. 2003, Beniston & Stoffel 2014), und der Rückgang der Feuchtgebiete, die durch ihre Retentionswirkung abflussschwächend wirken (Schober et al. 2015, Walz et al. 2019), sowie der Anstieg der Siedlungsflächen, die durch hohe Versiegelungsgrade geringe Infiltrationsraten und höhere Abflussgeschwindigkeiten aufweisen (Wheater & Evans 2009, Blöschl et al. 2015, De Niel & Willems 2019), der Reduktion entgegenwirken und höhere Abflussspitzen bewirken. Besonders in den alpinen Tallagen, in denen ein verstärkter Rückgang von Feuchtgebieten und ein verstärkter Zuwachs von Siedlungsflächen erwartet wird, kann das dann zu einem aktuell höheren Hochwasserrisiko führen, als es 1830 der Fall war.

Es ist nicht zu erwarten, dass die Frage der Hochwasserrisikoentwicklung in dieser Masterarbeit eindeutig geklärt werden kann, da Landbedeckungsklassen zwar Einfluss auf die Abflussbildnen ausüben können (wie oben erwähnt), doch auch andere Faktoren, wie Einzugsgebietsgröße oder klimatische Parameter, das Hochwasserrisiko beeinflussen können (Brown et al. 2005, Gaál et al. 2012). Besonders der Einfluss des Klimawandels ist nur schwer abschätzbar, da Flusshochwässern nicht linear auf die globale Erwärmung reagieren (Thober et al. 2018), regionale Abflussveränderungen meist komplexe Ursachen haben (Murray & Ebi 2012), und es regional abhängig ist, ob der Einfluss des Klimawandels insgesamt zu einer Abflussteigerung oder -minderung führt (Blöschl et al. 2019).

3 STUDIENGEBIET

Das Studienggebiet liegt im österreichischen Bundesland Salzburg (Abbildung 1) und umfasst das Einzugsgebiet der Salzach in ihrem Mittellauf vom Gasteinertal bis zur Stadt Salzburg. Als Teilgebiet des Projekts PoCo-Flood beschränkt sich das Studienggebiet auf jene Teile des Einzugsgebiets, die innerhalb der Alpenkonventionsgrenze liegen. Geologisch gesehen umfasst dieses Gebiet Teile der nördlichen Kalkalpen, des Tauernfensters, des norischen Fensters (Grauwackenzone), der Flyschzone und des Pleistozäns im Allgemeinen (Pestal & Hejl 2005). Bedeutende Bergmassive des Gebiets sind Tennengebirge, Hagengebirge und Hochkönig, sowie die angrenzenden Hohen und Niederen Tauern. Damit umfasst das Gebiet Höhenlagen von knapp 3000 m bis hin zu etwa 420 m stromabwärts der Stadt Salzburg.



Abbildung 1 | Lage des Studienggebiets in Österreich

Die verschiedenen Höhenlagen spielen auch bei der Niederschlagsverteilung eine Rolle, wobei generell ein Niederschlagsmaximum in den Sommermonaten festgestellt werden kann, mit einer gemittelten Jahressumme von etwa 1270 mm (Breiling 1993). Die Salzach besitzt ein nival-glaziales Abflussregime und ihr gegenwärtiger Mittelwasserabfluss im Studienggebiet liegt zwischen ca. 80 m³/s (Pegel Wallnerau) und ca. 240 m³/s (Pegel Oberndorf) (Wimmer et al. 2012). Wichtige Zubringer der Salzach im Studienggebiet sind dabei unter anderem Gasteiner Ache, Großer Ache, Kleinarler Arche, Fritzbach, Lammer und Almbach (Abbildung 2).

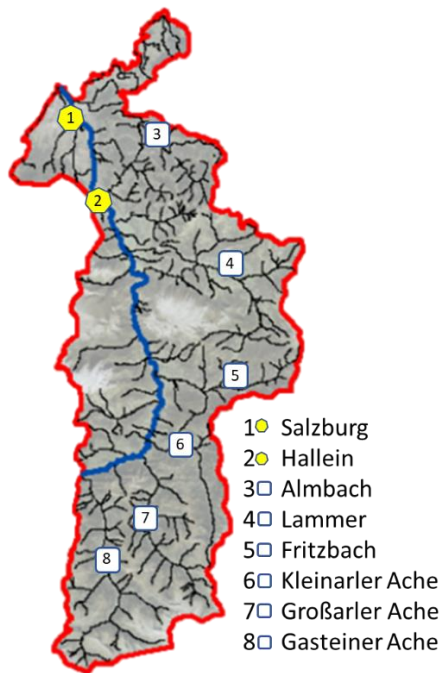


Abbildung 2 | Wichtige Zubringer der Salzach im Studiengebiet

Mit einer Größe von 2395 km² umfasst das Studiengebiet, wie in Abbildung 3 ersichtlich, die politischen Bezirke Salzburg Stadt, Salzburg Umgebung, Hallein und St. Johann im Pongau – wobei die westliche Begrenzung des Studiengebiets der Wasserscheide folgt, die die Bezirke St. Johann im Pongau und Zell am See trennt – das Einzugsgebiet der Oberen Salzach wurde im Rahmen einer anderen Masterarbeit behandelt (Sterle in Bearb.). Die Stadt Salzburg ist heute, und war 1830, der größte urbane Ballungsraum im Studiengebiet, ein weiterer wichtiger Ort ist die Stadt Hallein.



Abbildung 3 | Lage des Studiengebiets im Bundesland Salzburg

Aus historischer Sicht sind die Alpen, und somit das Studiengebiet, kein Stück unberührter Natur, sondern ein Kulturraum, der seit langer Zeit menschlichen Eingriffen ausgesetzt ist. Schon in der Bronzezeit wurde Kupfer im Salzburger Pongau abgebaut (Adlassnig et al. 2011, Pflanzl 2015). Anthropogene Einflüsse (Mühlendämme, Forstwirtschaft, Landnutzung) auf das Flussökosystem der Salzach reichen mindestens bis ins Mittelalter zurück (Haidvogel et al. 2014). Besonders die intensive Waldnutzung hatte Einfluss auf das Studiengebiet. Ab dem 11. Jahrhundert wurden Wälder im Einzugsgebiet der Salzach verstärkt gerodet. Grund dafür war neben dem Bergbau vor allem die Salzgewinnung. Vor allem während der Blütezeit des Salzhandels im 16. Jahrhundert wurden zur Feuerung der Salzpflanzen in Hallein beträchtliche Mengen Holz benötigt (Wiesbauer 1999). Ab der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts kam die Salzproduktion in Salzburg immer mehr zum Erliegen (McGrath et al. 2015).

Lokale Flussbaumaßnahmen begannen im 14. Jahrhundert und wurden in den folgenden Jahrhunderten fortgesetzt (Haidvogel et al. 2015). Wiesbauer (1999) berichtet von großräumigen Regulierungen der Salzach ab dem 15. Jahrhundert, wobei ein Großteil der von ihm erwähnten Regulierungen im Bereich der Unteren Salzach, flussabwärts von Salzburg, stattfanden. Doch auch um Hallein herum wurden Regulierungsmaßnahmen durchgeführt und im Stadtgebiet Salzburgs fanden ab dem 17. Jahrhundert Teilregulierungen statt (Wiesbauer 1999).

Ab dem 19. Jahrhundert verstärkten sich in Salzburg, wie im ganzen österreichischen Alpenraum, die Regulierungstendenzen um die Flussschifffahrt und den Hochwasserschutz voranzutreiben (Haidvogel 2008, Patt 2016, Rohr 2019). Der Bau von Staudämmen und Stauseen zur Wasserkraftgewinnung sowie die steigende Besiedlung der Flussauen, und den dadurch notwendigen intensiveren Hochwasserschutz, verstärkten diese Regulierungsmaßnahmen im 20. Jahrhundert (Wiesbauer 1999, Haidvogel et al. 2018, Hein et al. 2019).

4 DATENQUELLEN UND MATERIAL

Die Datengrundlagen dieser Arbeit bestehen einerseits aus historischem Kartenmaterial, und andererseits aus gegenwärtigen Fernerkundungsdaten. Um möglichst vollständige Datengrundlagen zu haben und um die verschiedenen Informationen vergleichen zu können, wurden sowohl für die historischen als auch für die aktuellen Datensätze mehrere Quellen kombiniert.

Die historische Landbedeckung wurde aus den Mappenblättern des Franziszeischen Katasters entnommen (vgl. <https://mapire.eu/de/map/cadastral>). Der Franziszeische Kataster war als Besteuerungsgrundlage konzipiert und stellt die Bodenbedeckung/Nutzungen der einzelnen Grundstücke dar. Im Einzugsgebiet der Mittleren Salzach wurden diese Kartierungen 1829 und 1830 durchgeführt, wobei für steuerlich relevante Gebiete die Genauigkeit mit Abweichungen von maximal 1% sehr hoch ist (Haidvogel 2008). Höhere Lagen oder steuerlich unproduktive Flächen – wie Flussräume und Gletscher – wurden oft nicht so exakt aufgenommen. Um diese Flächen besser zu erfassen, wurde ergänzend zum Franziszeischen Kataster die Franziszeische Landesaufnahme („Zweite Landesaufnahme“) verwendet (vgl. <https://mapire.eu/de/map/secondsurvey-salzburg/>). Diese hatte durch ihren militärischen Hintergrund einen Fokus auf strategische Landschaftselemente wie Wasserläufe und Geländetopografie, und stellt somit eine ideale Ergänzung zum Franziszeischen Kataster dar. In Salzburg wurde die Franziszeische Landesaufnahme in den Jahren 1807 und 1808 und damit etwa zwanzig Jahre vor dem Franziszeischen Kataster durchgeführt.

Der aktuelle Datensatz basiert primär auf dem Projekt LISA - Land Information System Austria – und dessen Datensatz Level II von 2016 (Banko et al. 2010, GeoVilleInformationSystems 2017). LISA stellt hochwertige und harmonisierte Geoinformationen über den Zustand und die Entwicklung der Landbedeckung und Landnutzung in Österreich zur Verfügung (<https://www.landinformationssystem.at/>) (Grillmayer et al. 2010). Die Landbedeckung wird im LISA-Datensystem, mit einer Rastergröße von 10 m, automatisch und lückenlos aus Fernerkundungsdaten erfasst. Dabei werden in der Datenauswertung die hohe räumliche Auflösung von Orthofotos und Höhendaten mit der thematischen Informationstiefe von multispektralen, wiederkehrenden Satellitendaten des ESA-Satellitenprogramms Sentinel-2 kombiniert. Das führt zu relativ hoher geometrischer und thematischer Präzision der 13 Landbedeckungsklassen und 12 Attributen (GeoVille 2012, GeoVilleInformationSystems 2017). Die LISA-Daten weisen allerdings einige Ungenauigkeiten – besonders in Bezug auf Agrarflächen, Fließgewässer und kleinere Siedlungsflächen – auf. Daher wurden Daten aus dem „Integrierten Verwaltungs- und Kontrollsystem INVEKOS“ (BMLFUW & BAB 2017), das Daten von nahezu allen in Österreich landwirtschaftlich genutzten Flächen umfasst, miteinbezogen. Weiters wurden die Gletscherflächen mit Stand 2015 aus Buckel & Otto (2018) abgeleitet. Mittlere Fließgewässer und kleinere Teiche wurden aus Genauigkeitsgründen aus OpenStreetMap (Ramm 2019) als GIS-Shapefiles hinzugefügt und weiters durch manuelle Interpretation von Orthofotos ergänzt. Für kleinere Fließgewässer wurde auf den GIS-Datensatz des Projekts „SPARE“ (Muhar et al. 2018) zurückgegriffen.

Die aktuellen Hochwasserüberflutungszonen wurden auf Basis dreier Datensätze erstellt: Fließgewässer-Gefahrenzonen bzw. -Überflutungsgebiete der Bundeswasserbauverwaltung (BWV 2014), Gefahrenzonen bzw.

Überflutungsgebiete von Wildbächen und Muren der Wildbach- und Lawinenverbauung (WLV & BMLFUW 2011), und Hochwasserflächen der Hochwasserrisikozone HORA (<https://hora.gv.at/>) (BMLFUW 2014). Die GIS-Daten von BWV und WLV wurden vom BMLRT (Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus), Sektion I - Wasserwirtschaft, zusammengefasst, homogenisiert und als HQ₃₀₀-Überflutungsflächen freigegeben. Dieser Datensatz wurde um Flächen für HQ₂₀₀ aus der HORA-Abflussuntersuchung ergänzt. Weiters wurden Orthofotos und ein digitales Höhenmodell (DEM) mit einer Auflösung von 10 m (<https://www.data.gv.at/>) zur Schließung von Lücken verwendet. Die historischen Überflutungsgebiete für 300-jährliche Hochwässer basieren auf den aktuellen Überflutungsgebieten und wurden mit dem Franziszeischen Kataster abgeglichen sowie anhand eines digitalen Höhenmodells (DEM) mit 10 m Rasterweite adaptiert (vgl. Kapitel 5.2.2).

5 METHODIK

5.1 LANDBEDECKUNGSKARTEN

5.1.1 HISTORISCHE LANDBEDECKUNG

Der georeferenzierte, historische Datensatz wurde manuell durch On-Screen-Digitalisierung mit ESRI ArcGIS (ArcGIS Desktop 10.7.1, ESRI 2020) erstellt. Dabei wurden elf verschiedene Landbedeckungsklassen unterschieden. Die Landbedeckungsklassen entsprechen den Kategorien des Projekts PoCo-Flood und umfassen Siedlungsgebiete, Fließgewässer, stehende Gewässer, Feuchtgebiete, Grünland, Äcker, Weingärten, (Obst-)Baumwiesen, Wälder, Ödland und Gletscher (siehe Tabelle 1). Diese Klassen wurden abhängig von hydraulischer Rauigkeit und Abflusskoeffizienten definiert, wobei die spätere Weiterverwendung für ein Wasserbilanzmodell im Projekt PoCo-Flood berücksichtigt wurde.

Tabelle 1 | Beschreibung der aktuellen Landbedeckungsklassen

Aktuelle Landnutzungsklassen	Beschreibung der Klasseninhalte
Siedlungsgebiete	Große Einzelgebäude, Ansammlungen von mindestens drei Gebäuden mit angrenzenden Straßen, Plätzen, kleineren (Gemüse-) Gärten und Parks, breite Straßen außerhalb von Siedlungen
Fließgewässer	Flüsse und kleinere Bäche, einschließlich ihrer Sedimentbänke
stehende Gewässer	Teiche, Seen und Wasserspeicher
Feuchtgebiete	Sümpfe, Moore, Röhricht
Grünland	Wiesen, Weiden, alpines Grasland
Äcker	Getreidefelder, Gemüsegelder, große Gemüsegärten
Weingärten	Weingärten
(Obst-)Baumwiesen	Krummholzzone, Obstbaumwiesen, Weiden mit Streuobst, spärlich bewaldete Wiesen
Wälder	dicht bewaldete Gebiete
Ödland	Felsen, Felswände, Schuttfächer, Schotter-/Sand-/Steinbrüche, Lehmgruben
Gletscher	Dauerhafte Eisdecke

Die Mappenblätter des Franziszeischen Katasters, die ebenfalls normierte Landnutzungskategorien aufweisen (siehe Abbildung 4), wurden manuell vektorisiert, indem die Flurstücke als Shapefile-Polygone gezeichnet wurden und die jeweilige Landbedeckungsklasse als Attributwert hinzugefügt wurde. Da die historischen Katasterblätter jedoch über 30 Landnutzungs- und Landbedeckungsklassen mit etwa 70 zusätzlichen Kartierungssymbolen aufweisen, wurden einige der historischen Klassen aggregiert. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die Inhalte der digitalisierten Klassen und in Tabelle 2 sind die jeweiligen Beziehungen zwischen historischen und aktuellen Klassen zusammengefasst.

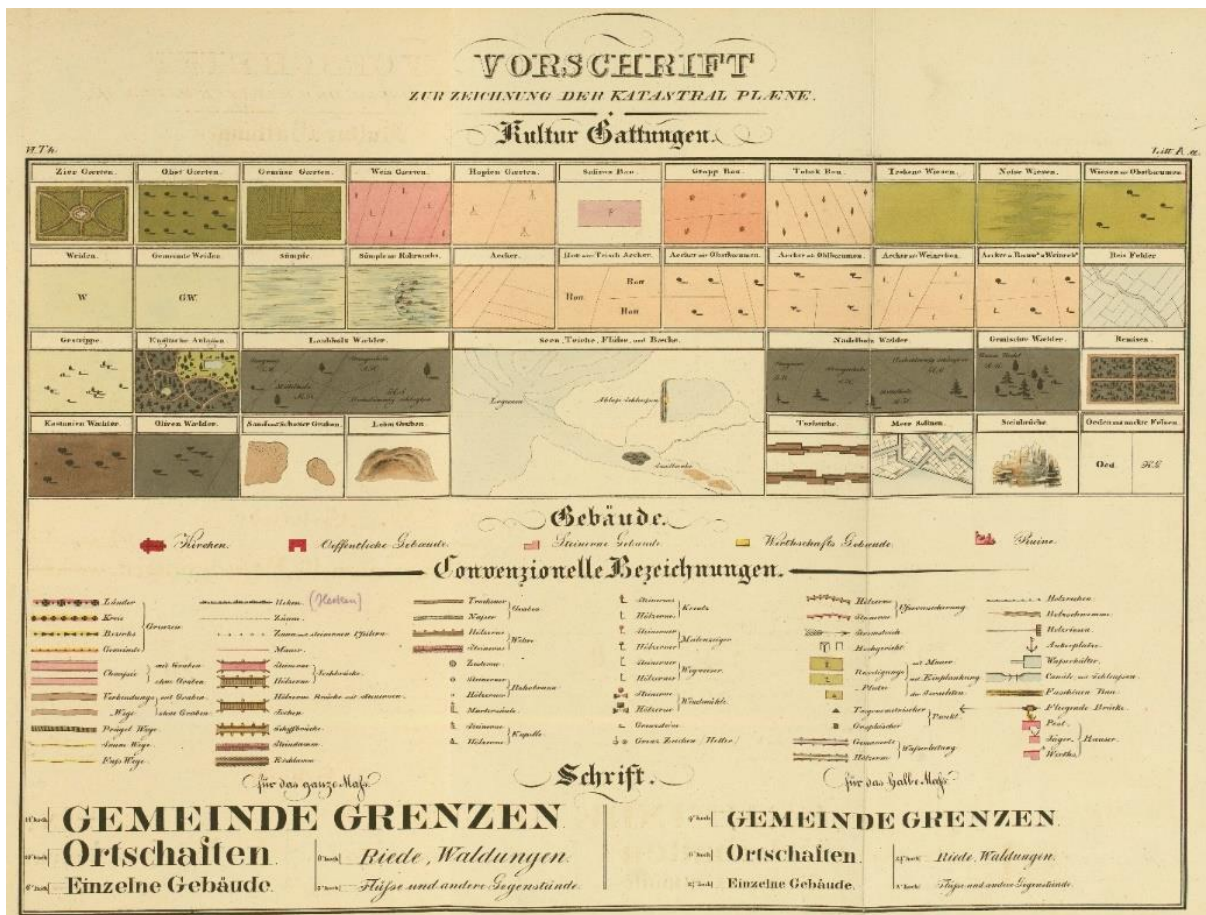


Abbildung 4 | Legende der historischen Klasseneinteilung – nach k.k. Landesregierung im Erzherzogtum Österreich unter der Enns (1824)

Im Allgemeinen wurden nur jene Flächen als eigenständige Klasse aufgenommen, deren Breite mindestens 10 m betrug. Die Ausnahme davon waren Fließgewässer, die jedenfalls ab einer Breite von 5 m, manchmal auch bei geringeren Breiten in die Digitalisierung aufgenommen wurden. Schotterflächen in direkter Flussnähe wurden als Teil des sogenannten „aktiven Gerinnes“ Fließgewässerflächen zugerechnet. Gebäude außerhalb großer Dörfer und Städte wurden als eigenständige Siedlungsfläche kartiert, wenn es sich um große Einzelgebäude handelte, oder mindestens drei kleinere Gebäude nah beieinanderstanden, und von einer gemeinsam genutzten Siedlungsfläche auszugehen war. Straßen und Wege außerhalb von Siedlungen wurden weitestgehend den sie umgebenden Klassen zugeordnet, kleinere Gärten und Parks in Ortsgebieten wurden der Siedlungsfläche zugeschlagen. Daher ist die Gesamtfläche der historischen Siedlungsgebiete vermutlich etwas kleiner als die hier erhaltenen Ergebnisse.

Es ist auch anzumerken, dass die Entscheidung für eine Landbedeckungsklasse nicht immer gleichbleibend getroffen werden konnte. Durch die unterschiedlichen Kartografen des Franziszeischen Katasters, die ihre Kartierungen in unterschiedlichen Genauigkeiten anfertigten, zeigen die verschiedenen Mappenblätter verschiedene Detailstufen. So wurden manchmal solitär stehende Bäume kartiert und Baumwiesen durch eine größere Anzahl an Bäumen dargestellt, während auf anderen Blättern einzelne Baum-Darstellungen auf einer Parzelle die gesamte Fläche als Baumwiese ausweisen. Bei diesen Unklarheiten wurde durch Einzelabwägungen

die wahrscheinlichste Landbedeckungsklasse gewählt. Ebenso wurden historisch manchmal Kulturgattungen kombiniert, sodass etwa eine „Wiese mit Bäumen“ in einer „Nassen Wiese“ vorhanden war. In solchen Fällen wurde die jeweils abflussrelevantere Landnutzungsklasse für die Digitalisierung gewählt.

Tabelle 2 | Gegenüberstellung historischer und aktueller Landbedeckungsklassen

Landbedeckungsklassen aktuell	Kulturgattungen 1824	Landbedeckungsklassen aktuell	Kulturgattungen 1824
Siedlungsgebiete	Kirchen	Weingärten	Weingärten
	Öffentliche Gebäude	(Obst-)Baumwiesen	Obstgärten
	Steinerne Gebäude		Wiesen mit Obstbäumen
	Wirtschaftsgebäude	Äcker mit Obstbäumen	
	Ruine	Gestrippe	
	Grenzen, Straßen, Wege, etc.	Wälder	Englische Anlagen
Fließgewässer	Laubholzwälder		
	stehende Gewässer		Nadelholzwälder
Feuchtgebiete			Gemischte Wälder
	Grünland		Remisen
Ziergärten		Kastanienwälder	
Trockene Wiesen		Olivenwälder	
Nasse Wiesen		Ödland	
Weiden			Sand- und Schottergruben
Gemeindeweiden			Lehmgruben
Gestrippe		Torfstiche	
Englische Anlagen	Steinbrüche		
Äcker	Ödland	Öden und nackte Felsen	
		Gletscher	Nur schematisch ausgewiesen
		nicht bestimmt	Saffranbau
			Grappbau
			Tobakbau
			Reisfelder
			Meer-Salinen
			Gemüsegärten
			Hopfungärten
Äcker			
Rott- / Trisch-Äcker			
Äcker mit Obstbäumen			
Äcker mit Ölbäumen			
Äcker mit Weinreben			
Äcker mit Bäumen und Weinreben			

Da die Genauigkeit der historisch aufgenommenen Gletscher und Fließgewässer schwankt – einerseits, weil es steuerlich uninteressante Flächen waren, andererseits, weil sich deren Breite und genauer Verlauf je nach Jahreszeit und Hochwassergeschichte ändert – wurde teilweise auf die Franziszeische Landesaufnahme (Zweite Landesaufnahme) zurückgegriffen. In diesen Fällen wurden die digitalisierten Landbedeckungsklassen aus den Karten der zweiten Landesaufnahme entnommen. Zusätzlich dazu kleinere Ödlandbereiche (z.B. Felswände, Schuttfächer) aus den aktuellen Landbedeckungsdaten ergänzt, da davon auszugehen ist, dass diese bereits am Anfang des 19. Jahrhunderts existierten.

5.1.2 AKTUELLE LANDBEDECKUNG

Die gegenwärtige Landbedeckung aus dem Jahr 2016 wurde von Severin Hohensinner für das Gesamtgebiet von PoCo-Flood erarbeitet (Hohensinner et al. in Bearb.). Dafür wurde der LISA-Datensatz Level II von 2016 verwendet. LISA zeigt insgesamt eine sehr hohe Genauigkeit – zwischen 85% und 98% pro Einzelklasse (Grillmayer et al. 2010) – weist allerdings in einigen Fällen Ungenauigkeiten auf. So entstanden Schwierigkeiten bei der Klassifizierung von Grünland und Wäldern. Schotterflächen in großen Flüssen wurden durch LISA oft als

Siedlungsgebiet ausgewiesen, parallel dazu wurden Straßen zwar als Siedlung erkannt, kleinere Gehöfte oder Siedlungen aber nicht. Dafür wurde Ödland teilweise fälschlicherweise als Siedlungsfläche klassifiziert.

Teilweise konnten diese Mängel durch die Inklusion anderer Datensätze behoben werden. Die INVEKOS-Daten, die für intensiv landwirtschaftlich genutzte Flächen auf Parzellenebene sehr genau sind, wurden zur feineren Differenzierung von Grünland, Ackerland, Weingärten und Obstplantagen genutzt. Die manuelle Einfügung der Fließgewässer (siehe unten) konnte großteils die Probleme der falsch klassifizierten Schotterflächen beheben. Dadurch fallen falsch ausgewiesene Schotterflächen insgesamt weniger stark ins Gewicht als fehlende Siedlungen, sodass die ausgewiesene Siedlungsfläche als Untergrenze der tatsächlich vorhandenen Siedlungsfläche anzusehen ist.

Durch das nachträgliche Einfügen von Fließgewässern aus OpenStreetMap und dem SPARE-Projekt konnten einige der fehlerhaften Schotter-/Siedlungs-Zuweisungen eliminiert werden, da die Flächen mit der korrekten Klasse eingefügt wurden. Da es sich bei den Fließgewässerdaten aus SPARE um Polylinien handelt, wurden diese jeweils nach Flussordnungszahl und Einzugsgebietsgröße bewertet. Daraufhin wurde für jede Klasse eine mittlere Gewässerbreite bestimmt, die weiters als Pufferbreite zur Erzeugung von Gewässerpolygonen verwendet wurde. Da im historischen Kataster alle Bäche mit mindestens 5 m Breite digitalisiert wurden, wurden in einem weiteren Schritt alle noch nicht erfassten Bäche manuell ergänzt. Dies geschah durch Pufferung von Polylinien der OpenStreetMap und Umwandlung in Gewässerpolygone, analog zu dem bei SPARE angewendeten Verfahren.

Wo weder eine Verwendung von SPARE noch die der OpenStreetMap möglich war, wurden die Gewässer manuell von S. Hohensinner basierend auf Orthofotos und Höhenmodell ergänzt. Die Gletscherflächen wurden aus Buckel & Otto (2018) übernommen, um eine höhere Genauigkeit zu erreichen.

Generell wurden in den aktuellen Datensatz nur jene Fließgewässer aufgenommen, die auch in der historischen Kartierung erfasst wurden, um eine Vergleichbarkeit der beiden Datensätze zu ermöglichen. In beiden Datensätzen sind alle Fließgewässer mit Einzugsgebieten ab 10 km² enthalten sowie alle Bäche, die Anfang des 19. Jahrhunderts eine Breite von mindestens 5 m aufwiesen, vereinzelt ergänzt von noch schmälere Bächen.

5.2 HOCHWASSERÜBERFLUTUNGSFLÄCHEN

5.2.1 AKTUELL

Die aktuellen Hochwasserüberflutungszonen wurden von S. Hohensinner auf der generellen Basis der Daten von WLW und BWV für Überflutungsflächen für Extremereignisse bei ca. HQ₃₀₀ (Stand 2019) generiert. Dieser Datensatz enthält allerdings nur jene Überflutungsflächen, für die bereits Hochwassermodellierungen bzw. -projekte vorliegen. Daher wurden die Überflutungszonen um Flächen für HQ₂₀₀ aus den HORA-Daten ergänzt. Die artifizellen Lücken zwischen den verwendeten Datensätzen (Überflutungsflächen der WLW, der BWV und HORA) wurden durch eine Überprüfung mittels Orthofotos und Geländemodell im GIS geschlossen. Die fehlenden Überflutungsflächen für kleinere Bäche, die in keinem der Datensätze erfasst waren, wurden ebenfalls anhand von Orthofotos und Geländemodell abgeschätzt. Der daraus resultierende Fehler ist relativ gering, da die kleineren Fließgewässer meist in schmalen Tälern oder Schluchten liegen, und nur selten breitere Talböden

beeinflussen. Da es sich bei stehenden Gewässern nicht um Überflutungsflächen im engeren Sinn handelt, wurden schließlich große stehende Gewässer (Seen und größere Teiche) aus dem Datensatz der Überflutungsgebieten ausgeschnitten.

Der Datensatz der aktuellen Hochwasserzonen bei ca. HQ₃₀₀ umfasst somit die Überflutungsgebiete aller Fließgewässer mit Einzugsgebieten von mindestens 10 km², die Überflutungsgebiete aller Fließgewässer mit einer historischen Breite von mindestens 5 m, und eine große Zahl kleinerer Gebiete an den Talhängen, die seitens der WLV als überflutungsgefährdet oder von Muren gefährdet eingestuft sind.

5.2.2 HISTORISCH

Die Grundlage der historischen Hochwasserüberflutungsgebiete sind die oben beschriebenen, aktuellen HQ₃₀₀-Zonen. Zusätzlich dazu wurde für jeden Fließgewässerabschnitt ermittelt, ob anthropogen verursachte abflusseinengende Bauwerke, wie Dämme, größere Straßen, Bahnlinien oder Anschüttungen für Siedlungsflächen aktuell vorhanden sind. Mithilfe des Franziszeischen Katasters, Orthofotos und DEM 10 m wurde weiters geprüft, ob diese Bauwerke oder Siedlungsanschüttungen bereits im 19. Jahrhundert vorhanden waren, oder ob jene Anschüttungen natürlichen Ursprungs sind. Wenn diese Frage verneint wurde, wurde abgeschätzt, bis wohin sich die laterale Ausdehnung der Hochwässer vor den einschränkenden Elementen erstreckt haben könnte. Dazu wurde die aktuelle Hochwasseranschlaglinie geländehöhenmäßig bestimmt und mit den Geländehöhen im Umland verglichen. Die historischen Überflutungsflächen wurden dann bis zum Antreffen eines höheren Geländes erweitert. Wo im Franziszeischen Kataster eindeutige Auenzonen erkennbar waren, wurden diese Flächen ebenfalls als Überflutungsflächen klassifiziert. In manchen Fällen liegen die früheren Aubereiche heutzutage höher als der Fluss. Wenn aufgrund der Darstellung im Franziszeischen Kataster sowie einer intensiven Regulierung anzunehmen ist, dass sich das Gewässer eingetieft hat, so wurden auch jene gegenwärtig höherliegenden, früheren Auegebiete in die historischen Überflutungszonen miteinbezogen.

Den historischen Überflutungsflächen ist nur schwer eine Jährlichkeit zuzuordnen, da die historischen Jährlichkeiten nicht bekannt sind und sich die Abflussverhältnisse seit damals vermutlich verändert haben. Diese Veränderung resultiert einerseits durch die Veränderung der Landnutzung, und andererseits durch den Klimawandel. Diese Prozesse, Veränderungen und Wechselwirkungen ermöglichen keine exakte Antwort auf die Frage, ob die historischen Überflutungsflächen größere, kleinere oder gleiche Hochwasserjährlichkeiten abbilden. Es kann jedoch festgehalten werden, dass die historischen Überflutungsflächen jene Bereiche abbilden, die damals vermutlich von Wasser bedeckt waren, wenn von der Wasserspiegellage heutiger 200-300-jährlichen Hochwässer ausgegangen wird.

5.3 FLÄCHENAUSWERTUNG

Die im GIS-Programm gesammelten Daten wurden anschließend mit Microsoft Excel ausgewertet. Dazu wurden einerseits jeweils die Gesamtflächen der einzelnen Landbedeckungsklassen in ihrem historischen und ihrem aktuellen Zustand verglichen. Zusätzlich konnte aufgrund der aus GIS exportierten Daten auch festgehalten werden, welche Landbedeckungsklassen in welchem Ausmaß eine Umwandlung in eine andere Landbedeckungsklasse erfahren hatten.

Eine ähnliche vergleichende Vorgehensweise wurde bei den Daten der Überflutungsflächen angewandt, wobei hier noch eine manuelle Korrektur der Fließgewässerdaten erfolgte, da aufgrund von Katasterungenauigkeiten nicht alle Fließgewässer innerhalb der zugehörigen Überflutungsgebiete verortet waren. Dieser Fehler wurde nachträglich rechnerisch mittels eines Flächenausgleichs von Landbedeckungsklassen behoben.

Um in weiterer Folge neben den numerischen Ergebnissen auch verbale Aussagen zu den Entwicklungen der Landbedeckungsklassen von 1830 bis 2016 treffen zu können, wurde ein Klassifikationsschema, das prozentuelle Veränderungen verbalen Klassifikationen zuordnet, aufgestellt und laufend angepasst (siehe Tabelle 3). Hierfür wurden bei Veränderungen bis zu 100 % des Ausgangswertes regelmäßige Klassenbreiten zu je 25 % gewählt. Für größere Veränderungen wurden die Klassenbreiten so gewählt, dass verschiedene Dimensionen der Veränderung eindeutig unterschieden werden konnten.

Tabelle 3 | Verbale Klassifikationen prozentualer Veränderungen der Landbedeckungsklassen

Verbale Klassifikation	Prozentuelles Wachstum / Rückgang bezogen auf den Ausgangszustand 1830
gering	0 – 25 %
mäßig	25 – 50 %
deutlich	50 – 75 %
stark	75 – 100 %
sehr stark	100 – 300 %
extrem stark	300 – 600 %
massiv	> 600 %

6 ERGEBNISSE

6.1 EINZUGSGEBIET

Die Ergebnisse der Digitalisierung der historischen und aktuellen Landbedeckung bestehen aus den rekonstruierten Landbedeckungskarten von 1830 und 2016 (Abbildung 5), sowie den jeweiligen Werten der flächigen Ausdehnung für jede Landbedeckungsklasse. In Abbildung 6 ist das Ergebnis des Rekonstruktionsprozesses den ursprünglichen Datenquellen für einen Detailausschnitt der Stadt St. Johann im Pongau gegenübergestellt.

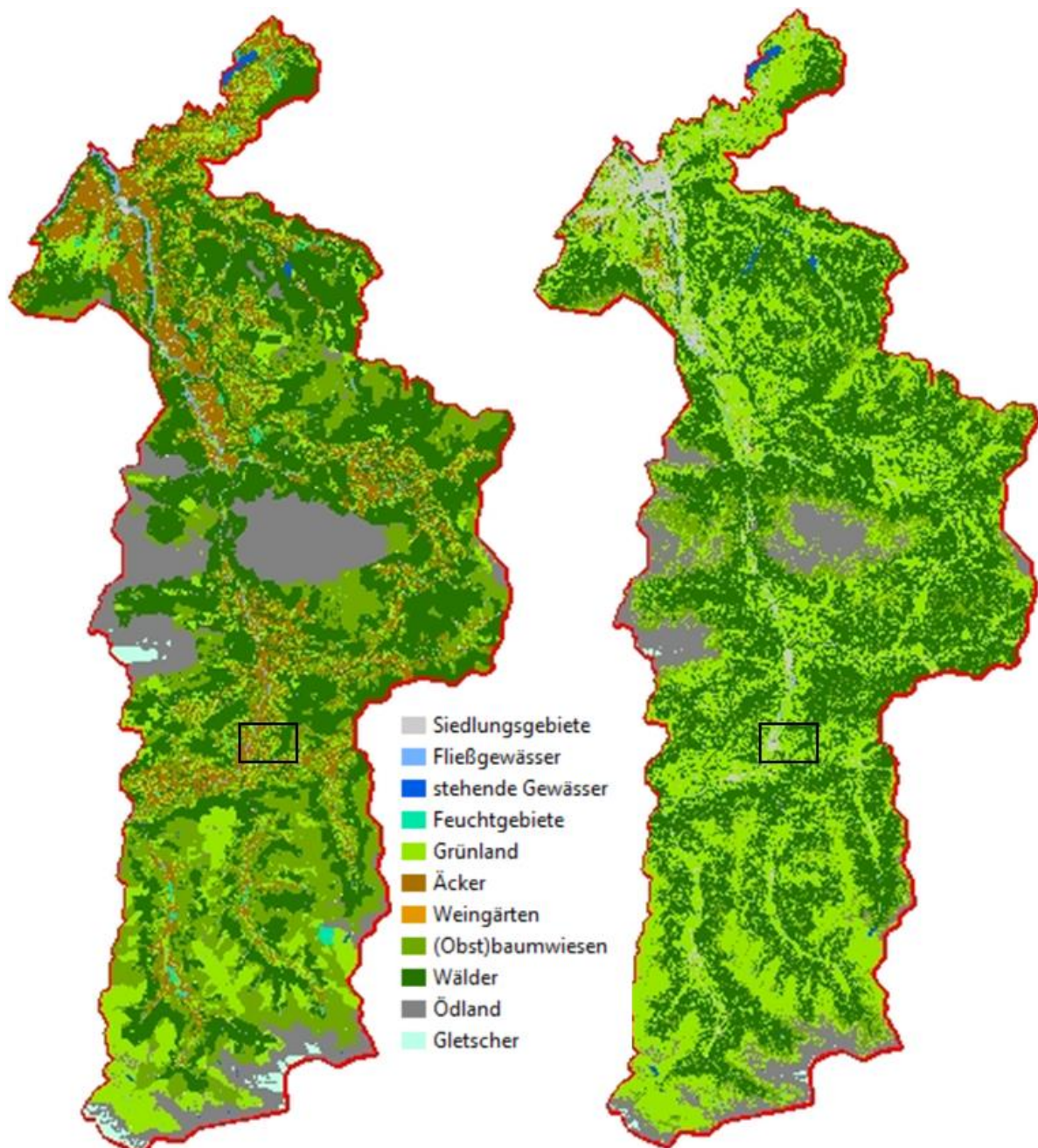


Abbildung 5 | Landbedeckungskarten für das Einzugsgebiet von 1830 (links) und 2016 (rechts) mit Markierungen des Detailausschnitts

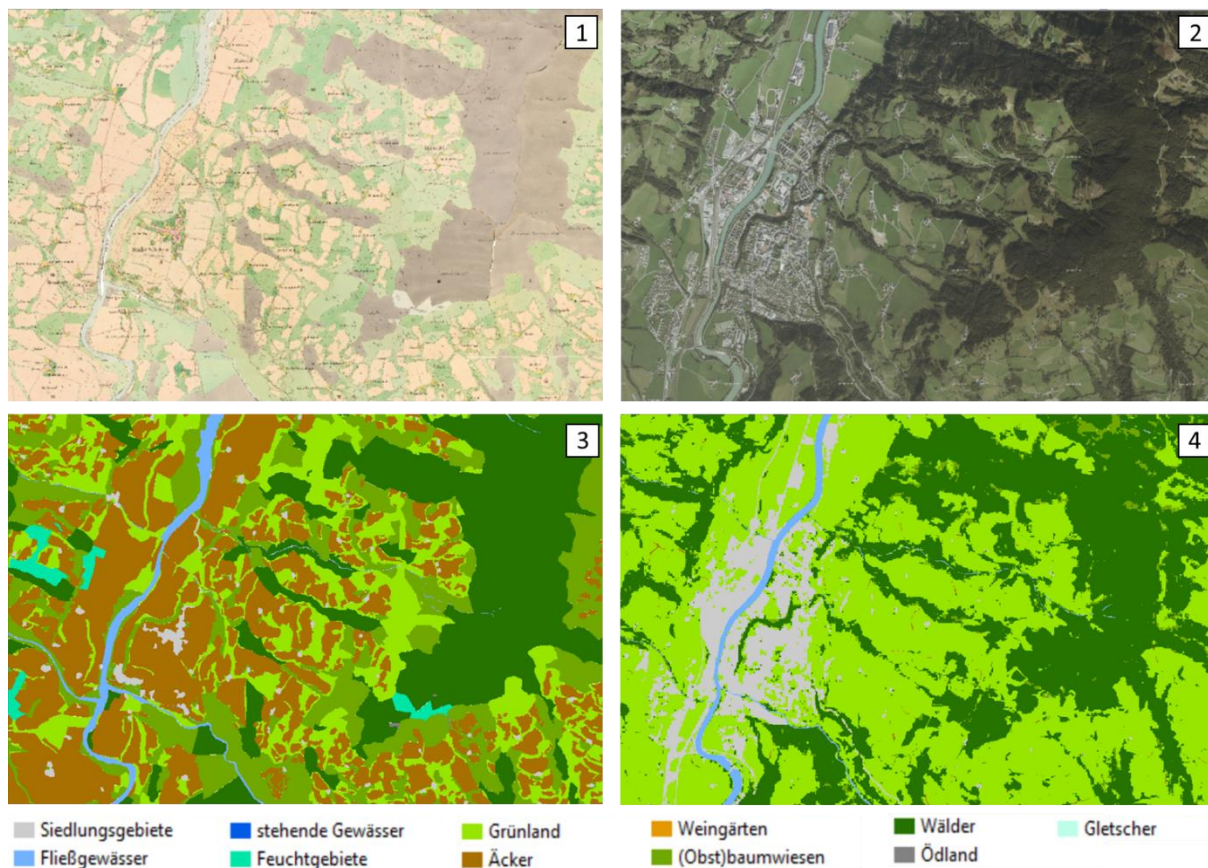


Abbildung 6 | Detaillausschnitt der Landbedeckungskarte. Links die historische Landbedeckung: Franziszischer Kataster (1) und Digitalisierung des Franziszischen Katasters (3). Rechts die aktuelle Landbedeckung: Luftbild (2) und LISA-gestützte Digitalisierung (4)

Die summierten Flächenwerte für jede Landbedeckungsklasse sowie deren respektive Prozentanteile am Einzugsgebiet sind in Tabelle 4 zusammengefasst. Abbildung 7 und Abbildung 8 stellen die jeweiligen Veränderungen graphisch dar.

- ◇ Siedlungsgebiete wuchsen von 11,29 km² (0,47 %) im Jahr 1830 auf 66,54 km² (2,78 %) im Jahr 2016 an. Das entspricht einem Zuwachs von nahezu 490 %.
- ◇ Fließgewässer verloren seit dem frühen 19. Jahrhundert mit 44,5 % fast die Hälfte ihrer einstigen Flächen – von damals 27,94 km² (1,17 %) auf 15,50 km² (0,65 %) heutzutage.
- ◇ Stehende Gewässer konnten einen Zuwachs von 46 % verzeichnen, von 4,89 km² (0,20 %) im Jahr 1830 auf 7,15 km² (0,30 %) im Jahr 2016.
- ◇ Feuchtgebiete, die 1830 mit 14,19 km² 0,59 % des Gesamtgebiets ausmachten, bedeckten 2016 nur noch 0,0054 km² (5377 m²) – das entspricht weniger als 0,01 Promille der Gesamtfläche und einem Flächenverlust von über 99 %.
- ◇ Grünland bedeckte 2016 mehr als die doppelte Fläche als 1830, mit aktuell 903,54 km² (37,72 %) und historisch 366,28 km² (15,29 %).
- ◇ Ackerflächen bedeckten historisch 288,99 km² (12,07 %) und aktuell 11,02 km² (0,46 %). Das entspricht einem Flächenverlust von mehr als 96 %.

- ◇ Weingärten existieren ausschließlich im historischen Datensatz, wo sie mit 0,0093 km² (9295 m²) weniger als 0,01 Promille der Gesamtfläche abdecken. Im aktuellen Datensatz gibt es keine Flächen die als Weingärten klassifiziert sind.
- ◇ (Obst-)Baumwiesen gingen von 1830 bis 2016 um etwas weniger als 60 % zurück, da sie von ehemals 528,07 km² (22,05 %) aktuell nur noch 217,88 km² (9,10 %) bedecken.
- ◇ Wälder bedeckten im Jahr 1830 865,34 km² (36,13 %) der Gesamtfläche. Im Jahr 2016 wurden 995,33 km² (41,56 %) der Gesamtfläche als Wald klassifiziert. Waldflächen sind daher um 15 % angewachsen.
- ◇ Ödland ging im Untersuchungszeitraum von 270,04 km² (11,27 %) auf 175,55 km² (7,33 %) zurück. Das entspricht einem Rückgang von etwa 35 %.
- ◇ Gletscher bedeckten Anfang des 19. Jahrhunderts 18,08 km² (0,75 %) des Gesamtgebiets. Anfang des 21. Jahrhunderts bedeckten sie noch 2,60 km² (0,11 %). Das entspricht von einem Flächenverlust von rund 86 %.

Tabelle 4 | Flächenauswertung der Landbedeckungsklassen im gesamten Studiengebiet der Mittleren Salzach

	1830		2016		Veränderung
	km ²	%	km ²	%	%
Gesamt	2395,12	100,00	2395,12	100,00	-
Siedlungsgebiete	11,29	0,47	66,54	2,78	+ 490
Fließgewässer	27,94	1,17	15,50	0,65	- 44,52
stehende Gewässer	4,89	0,20	7,15	0,30	+ 46,15
Feuchtgebiete	14,19	0,59	0,0054	0,0002	- 99,96
Grünland	366,28	15,29	903,54	37,72	+ 147
Äcker	288,99	12,07	11,02	0,46	- 96,19
Weingärten	0,0093	0,0004	-	-	- 100
(Obst-)Baumwiesen	528,07	22,05	217,88	9,10	- 58,74
Wälder	865,34	36,13	995,33	41,56	+ 15,02
Ödland	270,04	11,27	175,55	7,33	- 34,99
Gletscher	18,08	0,75	2,60	0,11	- 85,61

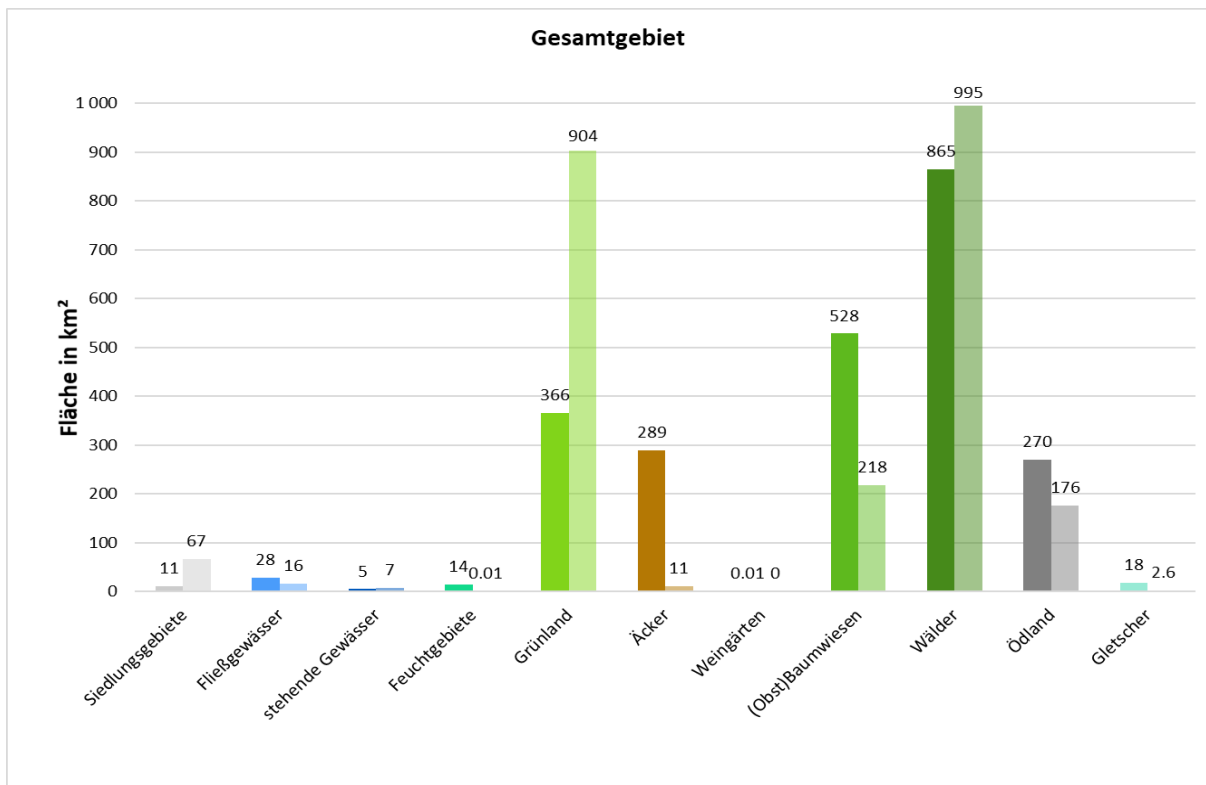


Abbildung 7 | Flächenbilanzen des Einzugsgebiets der Mittleren Salzach in km²; 1830 (jeweils linke Balken) und 2016 (jeweils rechte Balken)

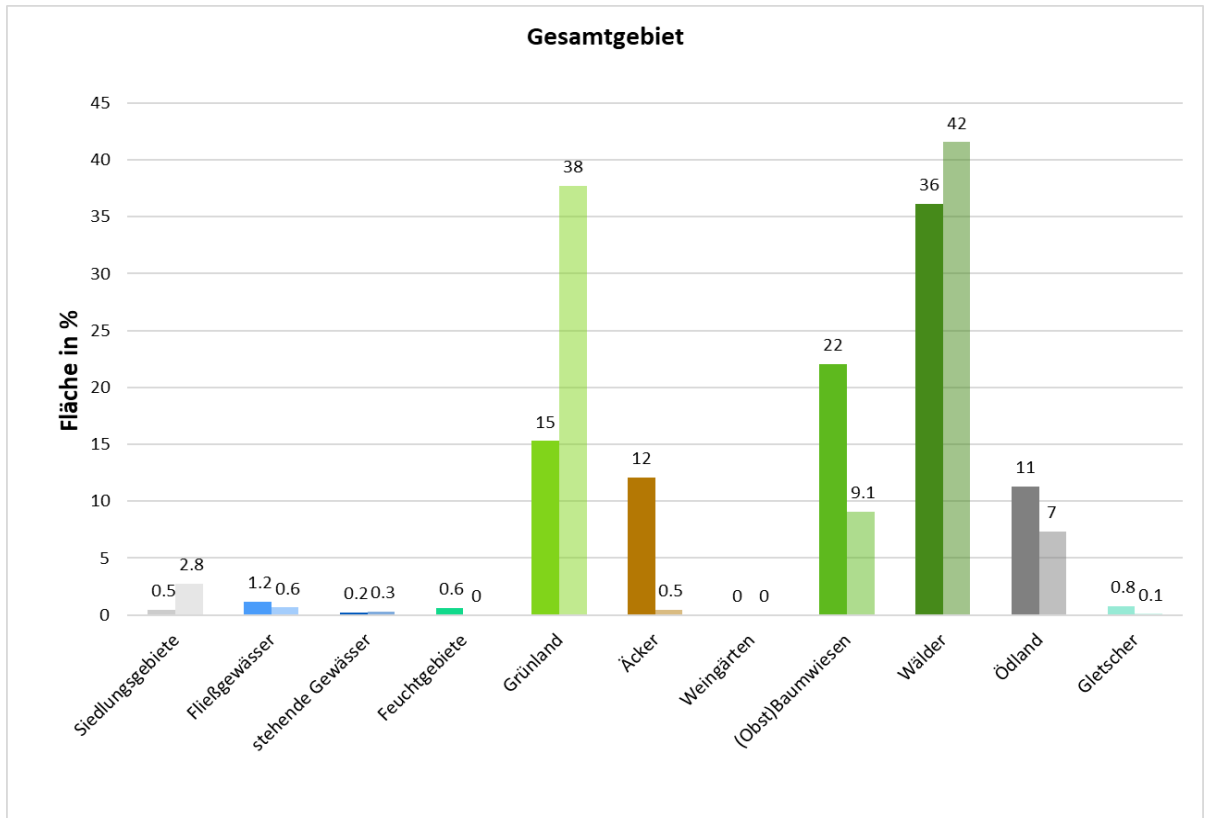


Abbildung 8 | Flächenbilanzen des Einzugsgebiets der Mittleren Salzach in %; 1830 (jeweils linke Balken) und 2016 (jeweils rechte Balken)

6.2 ÜBERFLUTUNGSGEBIETE

Auch die Landbedeckungsklassen in den Überflutungsgebieten eines gegenwärtigen 300-jährlichen Hochwassers wurden einander gegenübergestellt. Abbildung 9 zeigt die Lage der Überflutungsgebiete im Einzugsgebiet im Jahr 2016.

Im Jahr 1830 umfassten diese Überflutungszonen mit 161,57 km² etwa 6,7 % des untersuchten Einzugsgebiets. Im Jahr 2016 können mit 142,13 km² etwa 5,9 % des Einzugsgebiets als Überflutungsgebiete eines gegenwärtigen 300-jährlichen Hochwassers ausgewiesen werden – das entspricht einer Reduktion um etwa 12 % bezogen auf die Größe des Überflutungsgebietes 1830. Die Veränderung der Landbedeckungsklassen innerhalb der Überflutungsgebiete ist an verschiedenen Standorten unterschiedlich stark ausgeprägt (Abbildung 10 und Abbildung 11).

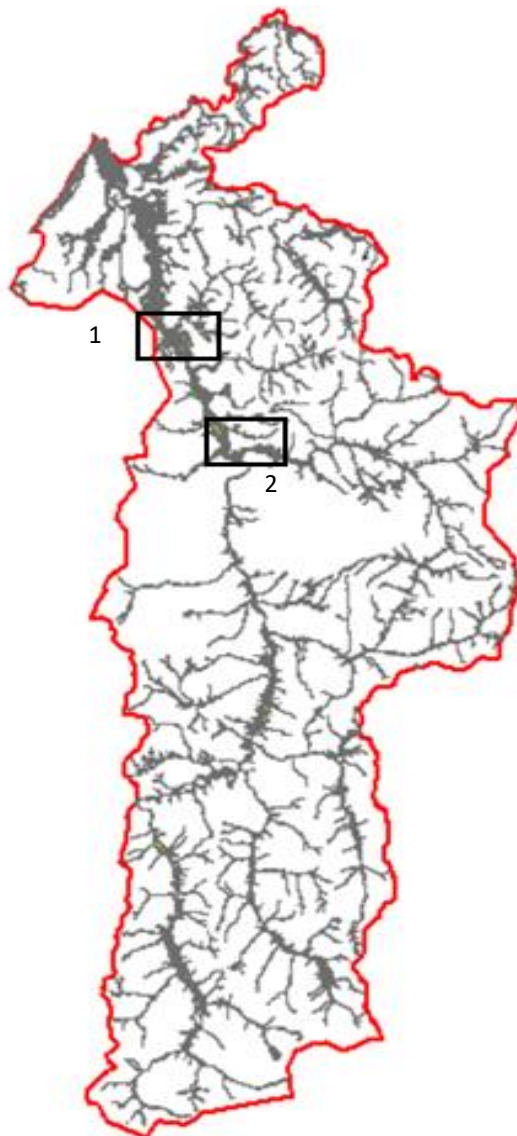


Abbildung 9 | Lage der Überflutungsgebiete im Einzugsgebiet 2016 mit Markierung Detailausschnitte

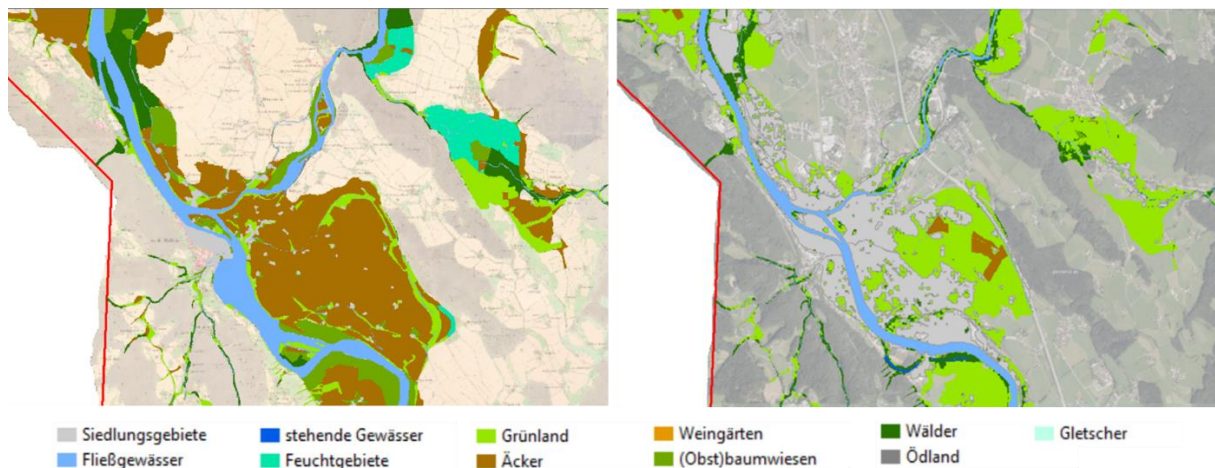


Abbildung 10 | | Landbedeckungsveränderung in den Überflutungsgebieten bei Hallein (vgl. Lage des Ausschnitts Nr. 1 in Abbildung 9). Links: Historische Landbedeckung 1830. Rechts: Aktuelle Landbedeckung 2016

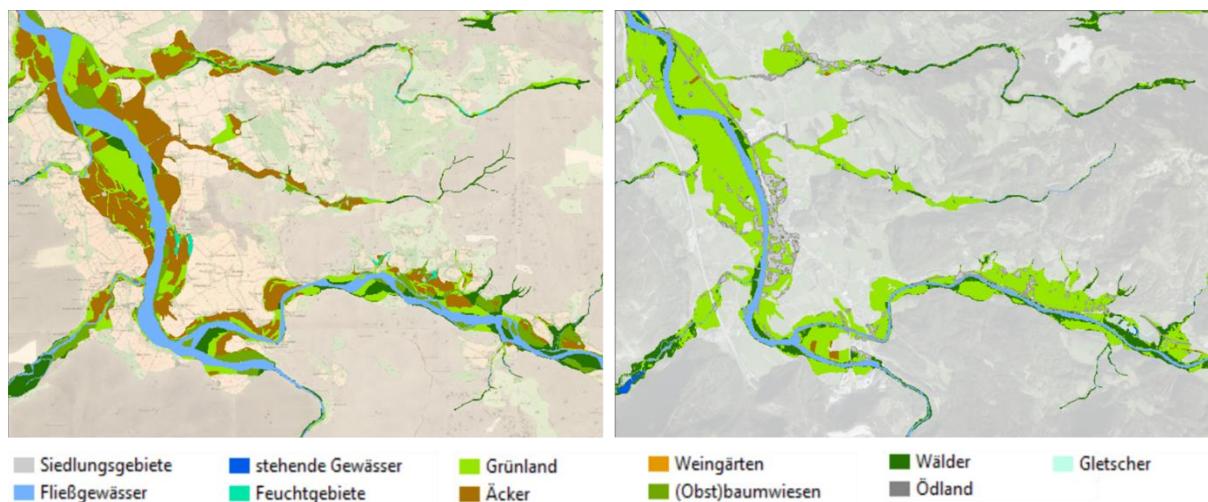


Abbildung 11 | Landbedeckungsveränderung in den Überflutungsgebieten bei Golling an der Salzach (vgl. Lage des Ausschnitts Nr. 2 in Abbildung 9). Links: Historische Landbedeckung 1830. Rechts: Aktuelle Landbedeckung 2016

In Tabelle 5 sind die Ergebnisse der Gegenüberstellung zusammengefasst. Abbildung 12 und Abbildung 13 stellen die jeweiligen Unterschiede graphisch dar. Da die Gesamtfläche der Überflutungsgebiete im Jahr 2016 um knapp 20 km² kleiner ist als jene im Jahr 1830, entsprechen die prozentuellen Gegenüberstellungen nicht exakt den numerischen Gegenüberstellungen.

- ◇ Siedlungsgebiete bedecken gegenwärtig (21,20 km² / 14,92 %) beinahe die zehnfache Fläche des historischen Ausgangswerts (2,23 km² / 1,38 %) in Überflutungsgebieten, es ist eine Steigerung um fast 850 % zu beobachten.
- ◇ Fließgewässer sind in Überflutungsgebieten von 27,94 km² (17,29 %) im Jahr 1830 auf 15,50 km² (10,91 %) im Jahr 2016 zurückgegangen.

- ◇ Stehende Gewässer sind eigentlich nicht Teil von Überflutungsgebieten. Die Ausweisung von 0,68 km² (0,48 %) als stehende Gewässer im aktuellen Datensatz bezieht sich auf kleinere, neu entstandene Teiche.
- ◇ Feuchtgebiete, die Anfang des 19. Jahrhunderts mit 5,68 km² noch 3,52 % der Überflutungsgebiete ausmachten, sind gegenwärtig aus den Überflutungsgebieten vollständig verschwunden.
- ◇ Grünland bedeckte 1830 etwa 32,48 km² (20,10 %) der Überflutungsflächen und ist in den letzten 180 Jahren um beinahe 110 % angewachsen, auf aktuell 71,16 km² (50,07 %). Prozentuell machen Grünlandflächen damit heutzutage mehr als die Hälfte der Überflutungsgebiete aus.
- ◇ Ackerflächen sind seit 1830 stark zurückgegangen. Damals bedeckten Äcker 40,41 km² (25,01 %), während sie heutzutage mit 2,26 km² (2,63 %) nur etwa 6 % der damaligen Fläche bedecken.
- ◇ Weingärten wurden in keinem Datensatz der Überflutungsgebiete dokumentiert.
- ◇ (Obst-)Baumwiesen gingen in den Überflutungsgebieten von 1830 bis 2016 um mehr als 80 % zurück. Historische 20,19 km² (12,49 %) stehen dabei aktuellen 3,74 km² (2,63 %) gegenüber.
- ◇ Wälder verzeichneten einen Rückgang. Im Jahr 1830 bedeckten 31,25 km² (19,34 %) Wald die Überflutungsgebiete, im Jahr 2016 bedeckten 26,81 km² (18,86 %) Wald die Überflutungsgebiete.
- ◇ Ödland ging um mehr als die Hälfte seiner historischen Flächen (1,40 km² / 0,86 %) zurück, sodass die aktuellen Ödlandgebiete 0,78 km² (0,55 %) in Überflutungsgebieten ausmachen.
- ◇ Gletscher wurden per Definition in keinem der beiden Überflutungsflächen-Datensätze dokumentiert.

Tabelle 5 | Flächenauswertung der Landbedeckungsklassen in den HQ300-Überflutungsbereichen im Einzugsgebiet der Mittleren Salzach

	1830		2016		Veränderung
	km ²	%	km ²	%	%
Gesamt	161,57	100,00	142,13	100,00	- 12,03
Siedlungsgebiete	2,23	1,38	21,20	14,92	+ 850
Fließgewässer	27,94	17,29	15,50	10,91	- 44,52
stehende Gewässer	-	-	0,68	0,48	-
Feuchtgebiete	5,68	3,52	-	-	- 100
Grünland	32,48	20,10	71,16	50,07	+ 119
Äcker	40,41	25,01	2,26	1,59	- 94,41
Weingärten	-	-	-	-	-
(Obst-)Baumwiesen	20,19	12,49	3,74	2,63	- 81,46
Wälder	31,25	19,34	26,81	18,86	- 14,21
Ödland	1,40	0,86	0,78	0,55	- 44,33
Gletscher	-	-	-	-	-

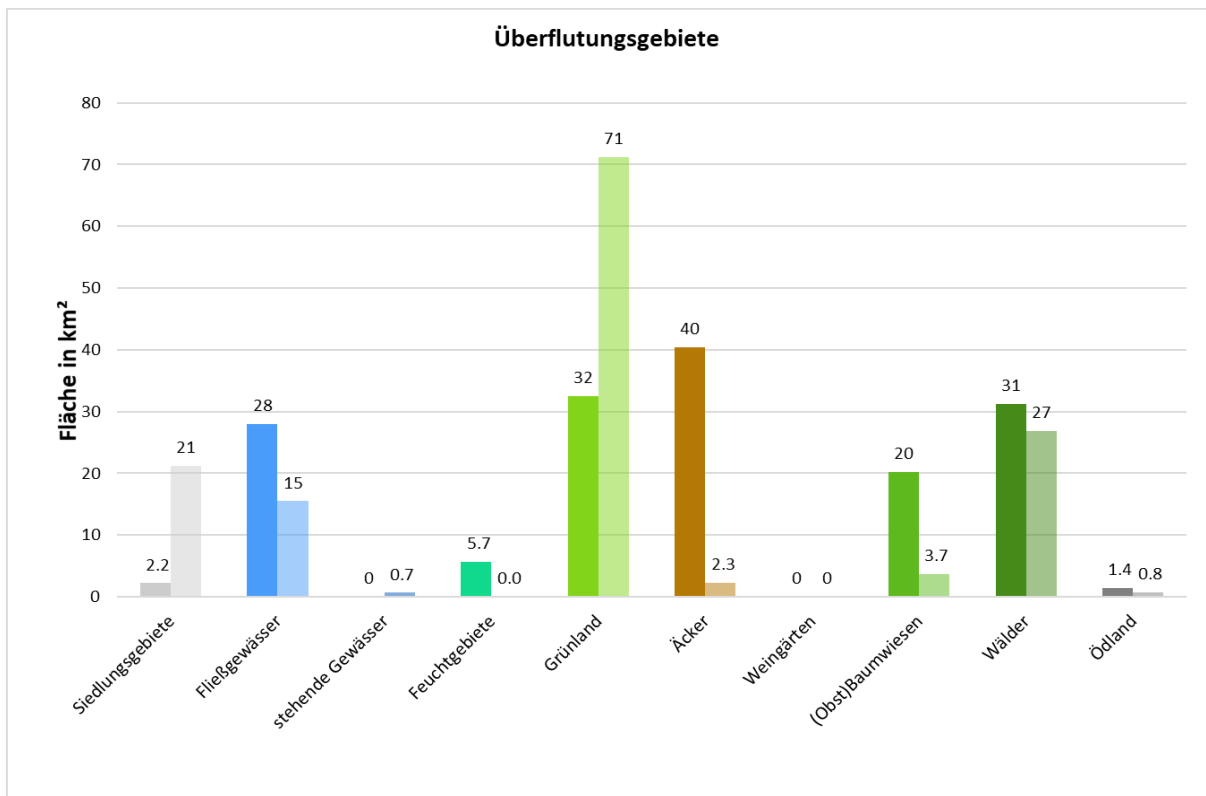


Abbildung 12 | Flächenbilanzen der Überflutungsgebiete des Studiengebiets der Mittleren Salzach in km²; 1830 (jeweils linke Balken) und 2016 (jeweils rechte Balken)

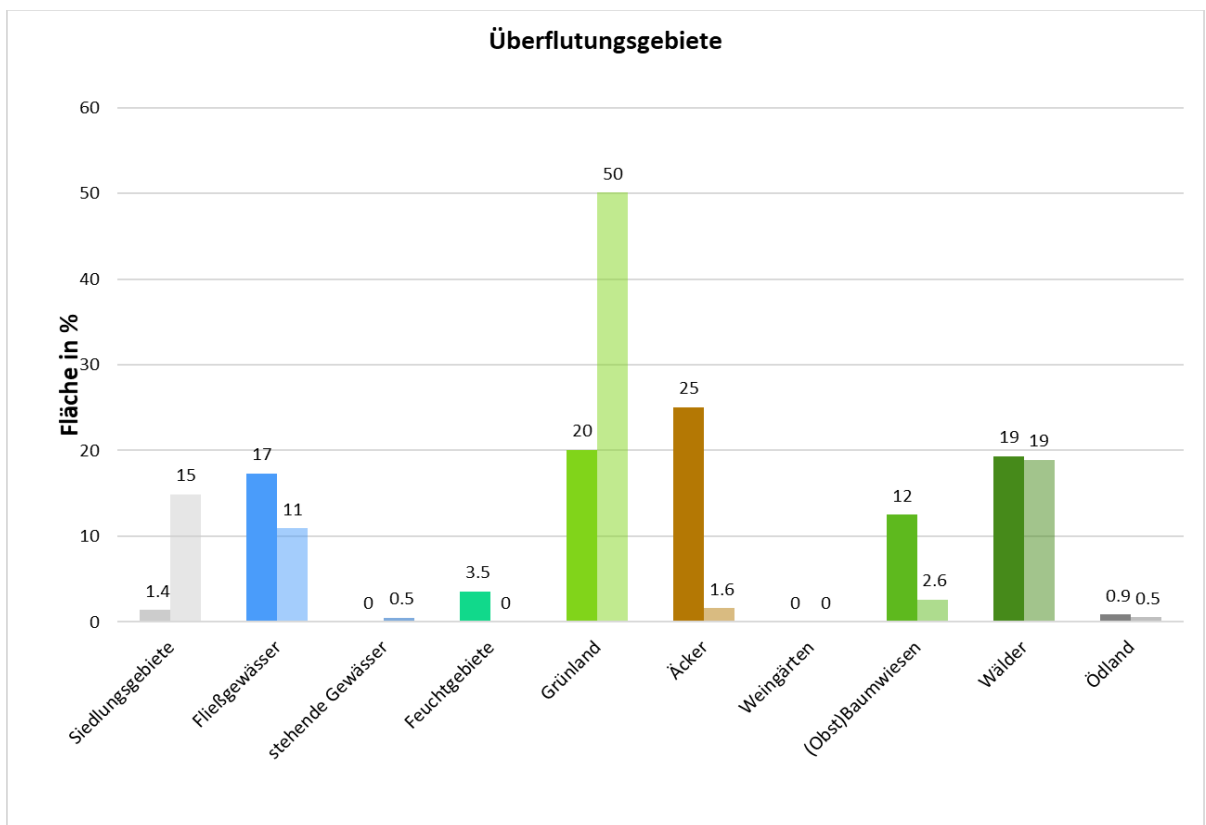


Abbildung 13 | Flächenbilanzen der Überflutungsgebiete des Studiengebiets der Mittleren Salzach in %; 1830 (jeweils linke Balken) und 2016 (jeweils rechte Balken)

6.3 VERGLEICH VON EINZUGSGEBIET UND ÜBERFLUTUNGSGBIETEN

Die Entwicklung der einzelnen Landbedeckungsklassen in den Überflutungsgebieten unterscheidet sich teilweise von der Entwicklung im Gesamtgebiet. Zur besseren Übersicht kann Abbildung 14 herangezogen werden, wobei anzumerken ist, dass die hier dargestellten Entwicklungen der Überflutungsgebiete auf den absoluten Flächenwerten basiert. Würden zum Vergleich die Prozentanteile der Landbedeckungsklassen an den Überflutungsgebieten herangezogen, verschöben sich einzelne Werte leicht (Anhang 4 und Anhang 5). Die verwendeten Begriffe entsprechen jenen des Klassifizierungsschemas aus Kapitel 5.3 (Tabelle 3).

In Abbildung 14 werden die Landbedeckungsklassen Fließgewässer, stehende Gewässer, Weingärten und Gletscher nicht dargestellt. Stehende Gewässer und Gletscher sind per Definition nicht Teil von Überflutungsgebieten. Weingärten sind in den Überflutungsgebieten der hier betrachteten Datensätze nicht vorhanden. Fließgewässer zeigten in absoluten Flächen keinerlei Veränderung, da sämtliche Fließgewässer in beiden Bezugsflächen inkludiert sind. Lediglich ihr prozentualer Anteil an den Überflutungsgebieten verschob sich (Anhang 4 und Anhang 5).

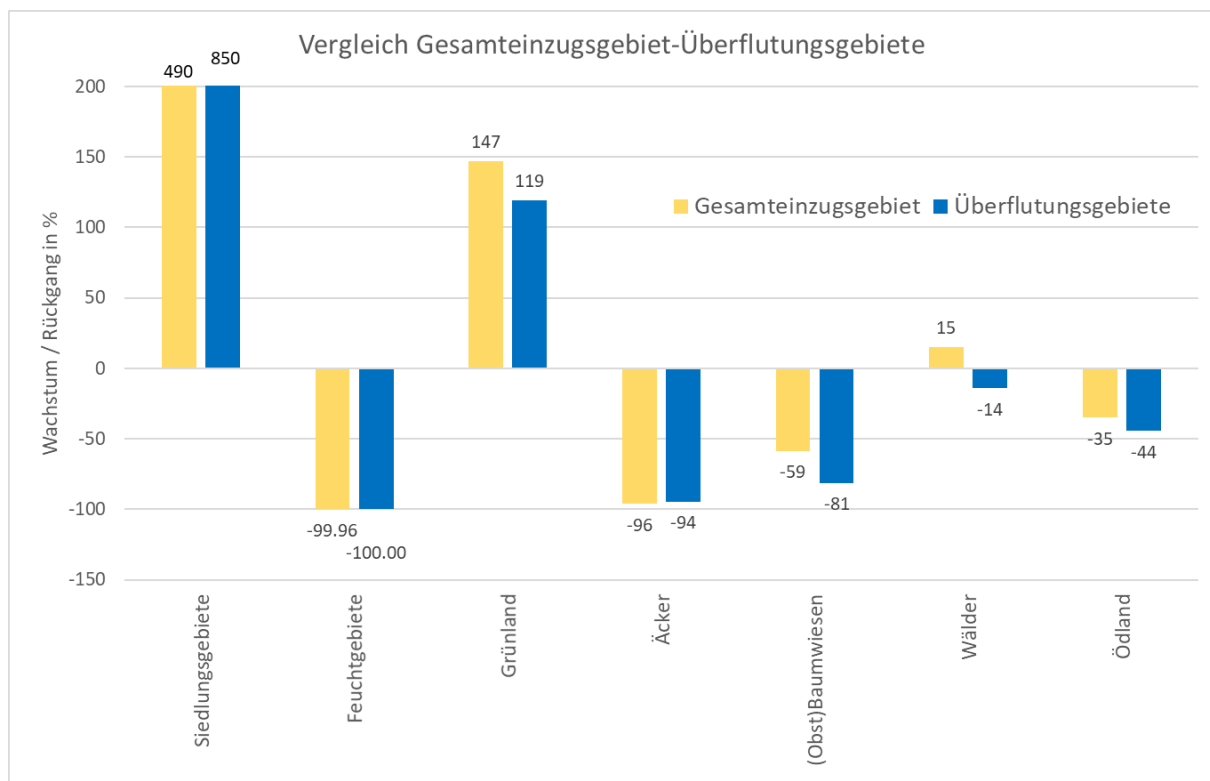


Abbildung 14 | Entwicklung der einzelnen Landbedeckungsklassen von 1830 bis 2016 im Vergleich zwischen dem Einzugsgebiet und den Überflutungsgebieten, bezogen auf die absoluten Flächenwerte in km²

Der auffälligste Unterschied zwischen Gesamtgebiet und Überflutungsflächen ist der Zuwachs der Siedlungsflächen. Der massive Zuwachs der Siedlungsflächen in den Überflutungsgebieten (+ 850 %) ist um 360 % größer als der extrem starke Zuwachs im Gesamteinzugsgebiet (+ 490 %). Wird der prozentuale Anteil an den Überflutungsflächen betrachtet, ist der Unterschied noch deutlicher (Anhang 4 und Anhang 5).

Grünland, Ackerflächen und Ödland entwickelten sich in den Überflutungsflächen ähnlich zum Gesamtgebiet. Äcker verzeichneten dabei einen nahezu identischen, starken Rückgang. Grünland wuchs in den Überflutungsgebieten etwas weniger an, zeigte jedoch sowohl im Gesamtgebiet als auch in den Überflutungsgebieten einen sehr starken Zuwachs. Ödland ging im Gesamtgebiet und in den Überflutungsgebieten mäßig zurück, auch wenn der Rückgang in den Überflutungsgebieten etwas stärker ausfiel.

Feuchtgebiete, die ebenfalls in beiden Gebieten ähnlich stark zurückgingen, nehmen eine Sonderrolle ein, da sie gegenwärtig aus den Überflutungsgebieten komplett verschwunden sind. Mit Ausnahme kleinere Feuchtflächen, die in den verwendeten Datensätzen nicht abgebildet sind, kann somit von einem hundertprozentigen Rückgang gesprochen werden.

(Obst-)Baumwiesen gingen in den Überflutungsflächen um 22 % stärker zurück als im Gesamtgebiet, womit von einem starken Rückgang in den Überflutungsgebieten, im Vergleich zu einem deutlichen Rückgang im Gesamtgebiet, gesprochen werden kann.

Waldflächen verzeichneten einen geringen Zuwachs im Gesamtgebiet (+ 15 %), während sie in den Überflutungsgebieten gering zurückgingen (- 14 %). Das Ausmaß des Rückgangs fällt weniger deutlich aus, wenn der prozentuale Anteil an den Überflutungsflächen betrachtet wird (Anhang 4 und Anhang 5).

6.4 TRANSFORMATIONEN DER LANDBEDECKUNG

Es wurden auch die Umwandlungen (Transformationen) von einer Landbedeckungsklasse in eine andere Landbedeckungsklasse innerhalb des Einzugsgebiets untersucht (Tabelle 6). Die Ergebnisse in absoluten Zahlen (km²) und die graphischen Darstellungen finden sich im Anhang (Anhang 7, Anhang 9, Anhang 10). Tabelle 6 ist dabei so zu verstehen, dass die ehemaligen Landbedeckungsklassen in den Spalten in die jeweiligen Klassen der Reihen umgewandelt wurden, wobei die Farbkodierung die Größe der Transformation angibt. Wenn alle Landbedeckungsklassen großteils unverändert geblieben wären, wäre eine Diagonale roter Zellen von links oben nach rechts unten erkennbar. Farbige Zellen, die sich nicht in dieser Diagonale befinden, deuten somit auf intensivere Umwandlungsprozesse von 1830 bis 2016 hin.

Tabelle 6 | Transformationen der Landbedeckungsklassen in %. Die Landbedeckungsklassen aus 1830 (in den Spalten) wurden bis 2016 in die jeweiligen Klassen (in den Reihen) zu den angegebenen Flächenprozent umgewandelt. *Durch die methodischen Schwierigkeiten bei der Klassifizierung von historischen und aktuellen Siedlungsgebieten (vgl. Kapitel 5.1) stellen diese Werte nicht die tatsächlichen Werte dar. So müssten alle Transformationen von Siedlungsgebieten in andere Landbedeckungsklassen kleiner ausfallen als hier angegeben und alle Transformationen von anderen Landbedeckungsklassen in Siedlungsgebiete müssten größer ausfallen.

		1830									
in %		Siedlungsgebiete	Fließgewässer	stehende Gewässer	Feuchtgebiete	Grünland	Äcker	Baumwiesen	Wälder	Ödland	Gletscher
2016	Siedlungsgebiete	41,5*	12,2*	0,7*	6,0*	2,8*	11,6*	1,0*	1,0*	0,1*	0,1*
	Fließgewässer	0,3*	31,4	0,2	0,9	0,4	0,1	0,3	0,4	0,0	0,0
	stehende Gewässer	0,0*	1,8	86,5	0,6	0,2	0,1	0,1	0,1	0,0	0,2
	Feuchtgebiete	0,0*	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Grünland	51,5*	25,3	8,4	74,0	70,1	81,7	44,0	11,2	21,1	1,0
	Äcker	0,0*	0,2	0,0	0,6	0,4	2,7	0,1	0,1	0,0	0,0
	Baumwiesen	0,6*	2,8	1,1	3,7	6,2	0,3	13,2	9,7	14,4	0,1
	Wälder	5,8*	26,1	2,1	14,2	19,9	3,5	41,3	77,5	5,0	0,0
	Ödland	0,2*	0,2	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	59,3	84,1
	Gletscher	0,0*	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	14,4
		100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

in %	>50	>25-50	>10-25	>1-10	0-1
------	-----	--------	--------	-------	-----

Den Ergebnissen ist generell zu entnehmen, dass zumindest Teile aller Landbedeckungsklassen in andere Klassen transformiert wurden. Auch jene Klassen, die in einer Gesamtbetrachtung Flächen hinzugewinnen konnten, verloren einige ihrer Flächen durch die Veränderung der Landbedeckungsklasse.

Dabei konnten stehende Gewässer (86,5 %), Wälder (77,5 %), Grünland (70,1 %) und Ödland (59,3 %) den Großteil ihrer ehemaligen Flächen erhalten. Gletscherflächen gingen zum größten Teil (84,1 %) in Ödland über. Fließgewässer wurden zu mehr als einem Viertel ihrer ehemaligen Fläche jeweils in Grünland (25,3 %) und Wälder (26,1 %) transformiert.

Es ist auffällig, dass sehr viele Landbedeckungsklassen mehr als 10 % ihrer ehemaligen Flächen durch Transformation in Grünland verloren. So wurden Feuchtgebiete zu 74 % und Äcker zu 81,7 % größtenteils in Grünland transformiert. (Obst-)Baumwiesen, wozu auch die hochalpinen Krummholzzonen gehören, wandelten sich zu 44 % in Grünland, und zu 41,3 % in Wälder. Wälder bildeten nach Grünland die zweite Landbedeckungsklasse, in die sich am meisten andere Klassen gewandelt haben.

Mit Blick auf die Landbedeckungsklasse Siedlungsgebiete scheint es, als hätte sich mehr als die Hälfte des ehemaligen Siedlungsgebiets in Grünlandflächen gewandelt. Ebenso scheinen etwas mehr als 10 % der Fließgewässer- und Ackerflächen in Siedlungsflächen transformiert worden zu sein. Durch die methodischen Schwierigkeiten (siehe Kapitel 5.1) ist jedoch anzunehmen, dass diese Werte verfälscht sind. Wahrscheinlicher

ist, dass die meisten ehemaligen Siedlungsflächen nach wie vor existieren. Umgekehrt dazu ist es ebenfalls wahrscheinlich, dass deutlich mehr ehemalige Fließgewässer- und Ackerflächen heutzutage Siedlungsgebiete sind.

7 DISKUSSION

7.1 METHODISCHE UNGENAUIGKEITEN UND INTERPRETATIONSSCHWIERIGKEITEN

Landbedeckungskarten, wie sie in dieser Arbeit betrachtet wurden, stellen stets nur einen augenblicklichen Zustand dar. Der Vergleich erfolgt zwischen der Landbedeckungsverteilung zum ersten Zeitpunkt und jener zum zweiten Zeitpunkt. Die Landschaftsentwicklung und -dynamik, die zwischen diesen Punkten auftritt, wird nicht berücksichtigt. Es muss daher festgehalten werden, dass die hier aufgezeigten Veränderungen nicht zwingend einer kontinuierlichen Entwicklung zugrunde liegen, sondern dass eine historische Momentaufnahme einer gegenwärtigen Momentaufnahme gegenübergestellt wird.

Die der historischen Momentaufnahme zugrundeliegenden Franziszeischen Katasteraufnahmen sind in einigen Punkten diskussionswürdig. Erstens war der Franziszeische Kataster als Steuergrundlage konzipiert, sodass einerseits nur steuerlich relevante Flächen mit hoher Genauigkeit kartiert wurden – was jedoch durch das zusätzliche Verwenden der Zweiten Landesaufnahme in dieser Arbeit nicht weiter ins Gewicht fällt – und andererseits klare Zuordnungen von Grundstücken und Landnutzungsklassen geschaffen wurden. So wechselt die Landbedeckung meist abrupt mit der Grundstücksgrenze, was vor allem in nicht intensiv bewirtschafteten Arealen in höheren Lagen vermutlich nicht der Fall war, da auch heutzutage der Kraut- und Strauchbewuchs mit zunehmender Höhe nur allmählich abnimmt (Fischer et al. 2019). Weiters weisen die meisten Grundstücke nur eine einzige Landbedeckungsklasse auf, im Gegensatz zu der erwartbaren Vielschichtigkeit der Landbedeckungsklassen – vor allem in naturbelasseneren Arealen. Zweitens wurden die Mappenblätter von mehreren unterschiedlichen Personen zu verschiedenen Zeiten angefertigt. Trotz detaillierter und aufwändiger Kartierungsvorschriften ist damit zu rechnen, dass die Kartierungen einerseits unterschiedlich präzise waren und andererseits die Landschaftsinformationen mehrerer Zeitpunkte zusammengeführt wurden. So kann etwa beobachtet werden, dass Flüsse ihre Breite von einem Mappenblatt zum nächsten flussabwärts deutlich verringern. Dies könnte daran liegen, dass der obere Flusslauf während der jährlichen Hochwasserführung im Frühling kartiert wurde, während der untere Flussabschnitt im Sommer bei Niederwasser kartiert wurde. Der Einfluss einzelner Kartographen auf die dokumentierte Landbedeckung eines kleinen Gebiets ist zwar merkbar, die strikten Kartierungsvorgaben verringern jedoch den möglichen Individualismus (k.k. Landesregierung im Erzherzogtum Österreich unter der Enns 1824). Zusätzlich fallen die jeweiligen Eigenheiten weniger ins Gewicht, je größer das betrachtete Gebiet ist. Da das Studiengebiet mehrere hundert Mappenblätter umfasst, kann davon ausgegangen werden, dass die Gesamtungenauigkeit, die durch Individualismus entstand, zumindest etwas ausgeglichen wird.

Der gegenwärtige Landbedeckungsdatensatz weist diese Probleme nicht auf, die Klassen wurden größtenteils automatisch durch Fernerkundungsanalysen ausgewertet und zeigen die Heterogenität der Landschaft in einem kleinteiligen Landbedeckungsbild. Dafür wurden einige Klassen inkorrekt zugeordnet, was unter anderem dazu führte, dass die ermittelten Werte der aktuell vorhandenen Siedlungsflächen höchstwahrscheinlich zu niedrig sind.

Da die historischen Siedlungsflächen aufgrund der bei der Digitalisierung angewandten Methode vermutlich zu groß sind, entstanden vor allem bei der Verschneidung der beiden Datensätze (Transformation – siehe 6.4) irreführende Flächenverteilungen. Es ist anzunehmen, dass die tatsächliche Transformation von Siedlungsflächen in Grünland deutlich geringer ausfiel, als es die Ergebnisse darstellen. Weiters ist anzunehmen, dass die tatsächlichen Transformationen von Fließgewässern in Siedlungsflächen und von Ackerflächen in Siedlungsflächen deutlich größer ausfielen, als hier präsentiert.

7.2 ÜBERPRÜFUNG DER HYPOTHESEN

Bezüglich der in Kapitel 2 gestellten Forschungsfragen F1 und F2, und den aufgestellten Hypothesen H1 und H2 (siehe Kapitel 2), kann basierend auf den Ergebnissen und der in Kapitel 5.3 definierten Klassifikation der Intensität der Veränderungen (Tabelle 3) Folgendes festgehalten werden:

7.2.1 LANDBEDECKUNGSVERÄNDERUNGEN IM EINZUGSGEBIET

Die Hypothesen *H1c (Rückgang der (Obst-)Baumwiesen)*, *H1d (Rückgang der Fließgewässerflächen)*, *H1e (Starker Rückgang der Gletscher)* und *H1f (Zunahme an Waldflächen)* können vollständig angenommen werden da (Obst-)Baumwiesen deutlich zurückgingen, Fließgewässer mäßig zurückgingen, Gletscher stark zurückgingen und Waldflächen gering anstiegen. Die Hypothesen *H1a (Rückgang der Ackerflächen)*, *H1b (Rückgang der Feuchtgebiete)* und *H1g (Zunahme an Siedlungsflächen)* müssen nicht verworfen werden, da die generelle Trendrichtung zutrifft; sie müssen aber angepasst werden, um ein vollständiges Bild zu liefern. Denn Ackerflächen und Feuchtgebiete gingen stärker zurück als ursprünglich angenommen, während Siedlungsgebiete sogar einen extrem starken Zuwachs verzeichneten. Abgesehen von den prognostizierten Veränderungen konnte auch ein Rückgang des Ödlands, ein mäßiger Zuwachs bei stehenden Gewässern sowie ein sehr starker Anstieg der Grünlandflächen beobachtet werden. Die vollständige Beantwortung der ersten Forschungsfrage (F1) lautet demnach:

Von 1830 bis 2016 gingen Fließgewässerflächen und Ödland mäßig zurück; (Obst-)Baumwiesen (inklusive Krummholzzonen) gingen deutlich zurück; Ackerflächen, Feuchtgebiete und Gletscher gingen stark zurück. Im selben Zeitraum konnten Wälder einen geringen Zuwachs, stehende Gewässer einen mäßigen Zuwachs, Grünland einen sehr starken Zuwachs, und Siedlungsflächen einen extrem starken Zuwachs verzeichnen.

Durch den Rückgang der Fließgewässerfläche können die Regulierungen und Kanalisierungen und Einengungen, die in großen Teilen Österreichs bereits belegt sind, für das Einzugsgebiet der Mittleren Salzach bestätigt werden (Haidvogel 2008, Haidvogel et al. 2018, Hein et al. 2019). Auch der gefundene starke Rückgang der Gletscher entspricht dem allgemeinen, großflächigeren Trend, dass Gletscherflächen seit Jahrzehnten rückläufig sind (Oerlemans 2005, Beniston & Stoffel 2014). Das von Tasser et al. (2017) in den Zentralalpen gefundene Ersetzen der Gletscherflächen durch Grünlandnutzung konnte jedoch nicht bestätigt werden, da im Studiengebiet Gletscher großteils durch Ödland ersetzt wurden.

Generell stimmt der Rückgang der Ackerflächen mit vielen Literaturbeispielen aus unterschiedlichen Regionen überein (Monteiro et al. 2011, Tasser et al. 2017). Jedoch übertrifft die Stärke des Rückgangs im Einzugsgebiet der Mittleren Salzach die Abnahme landwirtschaftlicher Fläche im Großteil der von Tasser et al. (2007) und Tappeiner et al. (2020) untersuchten Regionen des Alpenraums.

Der sehr starke Zuwachs der Grünlandflächen in den vergangenen 180 Jahren steht einerseits dem von Monteiro et al. (2011) dokumentierten Rückgang der Wiesen am Ende des 20. Jahrhunderts entgegen, und bestätigt andererseits die von Tappeiner et al. (2020) erwähnten Transformationsprozesse von Acker- in Grünland im gesamten Alpenraum. Die Transformation von Grünland in Wald fiel im Studiengebiet nicht so deutlich aus, wie in anderen Studien (Egarter Vigl et al. 2016, Tasser et al. 2017).

Der zu erwartende Zuwachs der Siedlungsflächen fiel im Studiengebiet deutlich größer aus, als in anderen Arbeiten, die sich mit Landbedeckungsveränderungen im Alpenraum beschäftigten, beschrieben (Tasser et al. 2007, Monteiro et al. 2011, Tappeiner et al. 2020). Ebenso überstieg das Ausmaß des Rückgangs der Feuchtgebiete jenes anderer Studien (Haidvogel 2008, Wheeler & Evans 2009, Gimmi et al. 2011).

Zwar wuchsen die Waldflächen im Studiengebiet deutlich geringer an als bei Tasser et al. (2007), und die gewonnenen Flächen setzen sich großteils nicht nur aus ehemaligen Weiden oder Baumwiesen zusammen, sondern auch aus ehemaligen Feuchtgebieten und Fließgewässern, doch kann der generelle Trend des Waldzuwachses im Alpengebiet bestätigt werden (Gellrich et al. 2007, Monteiro et al. 2011, Egarter Vigl et al. 2016).

7.2.2 UNTERSCHIEDE IN DER LANDBEDECKUNGSVERÄNDERUNG IN ÜBERFLUTUNGSGEBIETEN

Die Hypothesen *H2b (Ausgeprägter Rückgang von Feuchtgebieten)* und *H2c (Ausgeprägter Rückgang von (Obst-)Baumwiesen)* können angenommen werden, da (Obst-)Baumwiesen in den Überflutungsgebieten deutlich stärker zurückgingen als im Gesamtgebiet. Die Größenordnung des Feuchtgebiete-Rückgangs ähnelt in den Überflutungskorridoren zwar jenem des gesamten Studiengebiets, doch durch das vollständige Verschwinden der Feuchtgebiete in den Überflutungsgebieten kann von einem entscheidenden Unterschied gesprochen werden. Die Hypothese *H2a (Ausgeprägter Rückgang von Ackerflächen)* muss verworfen werden, da der Rückgang der Ackerflächen in den Hochwasserzonen etwa jenem im Gesamtgebiet entspricht. Die Hypothese *H2d (Stärkerer Zuwachs von Siedlungsgebieten)* muss angepasst, aber nicht verworfen werden, da zwar ein größerer Zuwachs an Siedlungsflächen festzustellen ist, die Dimension des Zuwachses jedoch bei weitem die Dimension der Zuwächse oder Rückgänge der anderen Landbedeckungsklassen übersteigt. Zusätzlich zu den bereits erwähnten Veränderungen ist noch anzumerken, dass ein geringer Rückgang der Wälder in den Überflutungsgebieten zu beobachten ist, der dem geringen Waldzuwachs im Gesamtgebiet gegenübersteht. Die vollständige Beantwortung der zweiten Forschungsfrage (F2) lautet also:

Die Überflutungsbereiche der 300-jährlichen Hochwässer unterscheiden sich vom Gesamtgebiet dadurch, dass (Obst-)Baumwiesen stärker zurückgingen, Feuchtgebiete gänzlich verschwanden und Waldflächen gering ab- statt zunahm. Weiters

verzeichneten Siedlungsgebiete massiven Zuwachs in den Überflutungszonen, womit sie dort gegenwärtig nahezu zehnmal so viel Fläche beanspruchen wie im Jahre 1830.

Die massive Zunahme der Siedlungsflächen in Überflutungsgebieten übersteigt, wie im gesamten Einzugsgebiet, die aufgrund der Literatur erwartbare Siedlungsexpansion im Alpenraum (Egarter Vigl et al. 2016, Tappeiner et al. 2020). Jedenfalls aber stimmen die Ergebnisse dieser Masterarbeit mit den Aussagen überein, dass Siedlungen im Tal stärker angewachsen sind als in höheren Lagen des Alpenraums (Tasser et al. 2007, Haidvogel 2008, Haidvogel et al. 2018).

Die von Egarter Vigl et al. (2016) gefundene Dominanz von Obst- und Getreideanbau in tieferen Alpenlagen, kann aufgrund des verstärkten Rückgangs von (Obst-)Baumwiesen in Überflutungsgebieten und der gleichartigen Abnahme von Ackerflächen im Einzugsgebiet und in den Überflutungsflächen nicht bestätigt werden.

Das Verschwinden der allermeisten Feuchtgebiete aus den Überflutungsgebieten wurde weder von Wheeler & Evans (2009) noch von Gimmi et al. (2011) oder von Haidvogel et al. (2018) explizit erwähnt, obwohl der generelle Rückgang der Feuchtgebiete thematisiert wird.

Obwohl der unterschiedlich starke Waldzuwachs in verschiedenen Höhenlagen von Tasser et al. (2007) behandelt wird, und Gellrich et al. (2007) den Großteil des Zuwachses in mittleren und höheren Lagen verortet, verzeichnen beide in den tieferen Lagen der West- und Zentralalpen keinen Waldrückgang, wie er in den Überflutungsgebieten des Studiengebiets beobachtet werden kann.

7.3 FOLGEN DER LANDBEDECKUNGSÄNDERUNGEN FÜR ABFLUSSPROZESSE

Landbedeckungsveränderungen können Folgen für die Abflussbildung und damit für die Hochwassergefahr haben (Brázdil et al. 2010, Rogger et al. 2017). Doch primär die klimatischen Faktoren – insbesondere Niederschlag und Lufttemperatur – beeinflussen den Abflussprozess (Sivapalan et al. 2005, Gaál et al. 2012, Blöschl et al. 2015). Die Veränderung der Landbedeckung und der langjährige, globale Klimawandel führen also höchstwahrscheinlich dazu, dass sich der gegenwärtige Hochwasserabfluss von jenem am Beginn des 19. Jahrhunderts unterscheidet.

In welcher Weise sich der Klimawandel konkret auf das Abflussregime von Fließgewässern auswirkt, ist jedoch nicht eindeutig geklärt. Manche Autoren erwarten durch die höheren Temperaturen gesteigerte Starkniederschläge, und damit erhöhte Hochwassergefahr (Murray & Ebi 2012, Dudula & Randhir 2016). Andere Studien weisen auf eine geringe Hochwassergefahr hin, da durch den Klimawandel lediglich der Winterabfluss ansteigt, während in den Sommermonaten – in denen in Zentraleuropa die meisten Hochwasserereignisse stattfinden – der Abfluss verringert wird (Holzmann et al. 2010, Frey 2015, Blöschl et al. 2020).

Jedenfalls verändert der Klimawandel die Abflussbedingungen europäischer Flüsse (Lehner 2006). Allerdings gibt es lokale und regionale Unterschiede – in einigen Regionen Europas hat der Klimawandel die Hochwasserabflüsse erhöht, während die Überflutungen in anderen Regionen zurückgegangen sind (Kundzewicz 2015, Blöschl et al. 2019). Das Studiengebiet liegt im Übergang zwischen a) einem Gebiet mit verringerter

klimaerwärmungsbedingter Hochwassergefahr und b) einem Gebiet indem sich durch den Klimawandel und die hohen Niederschläge die damit korrelierende Hochwassergefahr vermutlich erhöht hat – es weist somit beide Tendenzen auf, wobei die Zunahme der Hochwassergefahr eher überwiegt (Blöschl et al. 2019).

Auch vor dem Hintergrund, dass es im Laufe der Geschichte immer wieder sich abwechselnde hochwassereiche und hochwasserarme Perioden gab, ist die globale Erwärmung von Bedeutung (Blöschl et al. 2015, Hodgkins et al. 2017). Denn die gegenwärtige hochwasserreiche Periode ist nicht nur besonders stark von Überflutungen betroffen, sie unterscheidet sich auch von den überschwemmungsreichen Perioden der Vergangenheit durch überdurchschnittliche Temperaturen, anstatt der unterdurchschnittlichen Temperaturen früherer hochwasserreichen Perioden (Blöschl et al. 2020).

Die genauen kausalen Zusammenhänge zwischen dem Klimawandel und den Hochwasserabflüssen sind jedoch noch ungewiss (Briner et al. 2013a, Hodgkins et al. 2017). Das liegt zum einen an den komplexen Zusammenhängen in den Umweltsystemen, wodurch diese auf vielschichtigen Ebenen reagieren und somit gezielte Prognosen erschweren (Murray & Ebi 2012, Kundzewicz 2015). Daher reagiert das Abflussgeschehens eines Flusses selten linear auf die klimatischen Veränderungen der globalen Erwärmung (Thober et al. 2018). Zum anderen herrschen auch über die Beziehung von Landbedeckungsveränderungen und Klimawandel noch Zweifel, inwieweit diese sich gegenseitig beeinflussen (Bronstert et al. 2002, Brázdil et al. 2010, Tasser et al. 2017).

Die klimabedingten Abflussänderungen können daher in dieser Arbeit nicht weiter berücksichtigt werden. Der Fokus liegt stattdessen auf dem Einfluss der Landbedeckung auf das Abflussgeschehen. Auch auf die Landbedeckung hat der Klimawandel vermutlich Einfluss ausgeübt. Generell ist jedoch anzumerken, dass der Einfluss des Klimawandels auf Landbedeckung und Abfluss in hohen, eher naturbelassenen Höhenlagen einfacher nachgewiesen werden kann als in tieferen Lagen, in denen stark anthropogen eingegriffen wurde (Hodgkins et al. 2017).

Eine der bestbelegten Auswirkungen des Klimawandels, die auch im Studiengebiet beobachtet werden kann, ist der Rückgang der Gletscher (Vincent et al. 2007, Diolaiuti et al. 2011, Marshall 2014). Da Gletscher und Schneefelder als Puffer im Wasserkreislauf fungieren, führt der Rückgang der Gletscher in erster Linie zu einer geringeren Niederschlagsspeicherung (Jansson et al. 2003, Beniston & Stoffel 2014). Eine geringere Niederschlagsspeicherung wiederum hat im Falle eines Niederschlagsereignisses einen unmittelbar erhöhten Abfluss zur Folge. In weiterer Folge ändert sich durch die verringerte Gletscherfläche auch das Abflussregime glazial geprägter Fließgewässer, etwa indem sich die Abflüsse im Sommer stark verringern (Bliss et al. 2014).

Ödland, das eine geringe hydraulische Rauigkeit hat, weist tendenziell eine hohe Oberflächenabflussgeschwindigkeit und eine geringe Retentionswirkung auf (Mayor et al. 2009, Berendse et al. 2015). Daher wirkt die Verringerung der Ödlandgebiete, die zum größten Teil in Grünland und (Obst-)Baumwiesen transformiert wurden, abflussmindernd. Grünland und (Obst-)Baumwiesen wirken ihrerseits meist abflussmindernd, da sie bessere Infiltrationseigenschaften aufweisen als Ödland oder Ackerland, jedoch nicht so stark abflussmindernd wie Wälder (Nunes et al. 2011, Rogger et al. 2017). Bei beiden Landbedeckungsklassen

spielen die Bodeneigenschaften und die Hangneigung jedoch eine große Rolle, wenn das Erosions-, Infiltrations- und Abflusspotential betrachtet wird (Niehoff 2002, Markart et al. 2004, Cerdà et al. 2009b).

Wälder haben durch hohe Interzeption und Transpiration, geringere Bodenfeuchte und höhere Infiltrationskapazität eine abflussdämpfende Wirkung, die besonders bei mäßigeren und häufigeren Niederschlägen effektiv ist (Niehoff 2002, Blöschl et al. 2015, Rogger et al. 2017). Wälder schützen auch vor Bodenerosion und Sedimenttransport bei Ereignissen unterschiedlichen Ausmaßes (Bathurst et al. 2011), und verlangsamen Hochwasserwellen durch erhöhte „fließende Retention“ (Haidvogel et al. 2018, Wesemann et al. 2020). Im Gegensatz dazu haben Ackerflächen meist geringere Infiltrationsraten, einen höheren und schnelleren Oberflächenabfluss, und es tritt vermehrt Bodenerosion auf (Auerswald et al. 2009, Cerdà et al. 2009a, Wheeler & Evans 2009). Daher führen der Zuwachs an Waldflächen und die Reduktion der Ackerflächen im Gesamtgebiet zu geringerem Oberflächenabfluss und geringerem Sedimenteintrag in die Gewässer. In den Überflutungszonen sind diese Effekte jedoch weniger ausgeprägt, da dort zwar ein Rückgang der Ackerflächen, jedoch auch ein Waldrückgang zu beobachten ist. Der Waldrückgang wiederum verstärkt Oberflächenabfluss und Sedimenteintrag in den Überflutungsgebieten. Zudem verringert sich die sogenannte „fließende Retention“ und Hochwasserwellen werden weniger stark abgebremst (Pasche & Ploeger 2004, Horn & Richards 2007, Hughes et al. 2012).

Durch die Zunahme von Siedlungsflächen, besonders in den Überflutungsgebieten, erhöht sich der Anteil undurchlässiger Oberflächen, wodurch einerseits die Infiltration verringert wird (Niehoff 2002, Blöschl et al. 2015) – was zu größerem Oberflächenabflussvolumen und weniger Grundwasserneubildung führt – und andererseits die Abflussbildung durch die geringeren Rauigkeiten beschleunigt wird. Das bedeutet, dass der Wellenscheitel zeitlich vorverlagert werden kann (Niehoff 2002, Wheeler & Evans 2009). Mehr Siedlungsflächen führen somit generell zu größeren Hochwasserabflüssen, die in kürzerer Zeit eintreten und somit das Hochwasserrisiko erhöhen.

Feuchtgebiete und Uferzonen tragen durch ihre Fähigkeit zur Aufnahme und Rückhaltung von Oberflächenwasser in den Auen deutlich zum gesamten Hochwasserrückhalt innerhalb eines Flussgebietes bei, und dämpfen so Hochwasserspitzen bei größerem Abfluss (Richardson et al. 2011, Schober et al. 2015, Walz et al. 2019). Der Rückgang von Feuchtgebieten ist somit gleichbedeutend mit einem Rückgang an Retentionsräumen.

Der Rückgang von Fließgewässerfläche, der eine Verschmälerung der Flüsse anzeigt, bedeutet einerseits den zusätzlichen Verlust der Retentionsflächen in den Gewässern selbst. Andererseits führen schmälere Querschnitte zu höheren Fließgeschwindigkeiten desselben Abflussvolumens (Naudascher 1987, Lange & Lecher 1993), wodurch größere Abflussspitzen durch Überlagerung der Hochwasserwellen mit Beiträgen aus flussabwärts gelegenen Nebenflüssen zu erwarten sind (Blöschl et al. 2015, Skublics et al. 2016).

Die gegenwärtig kleineren Überflutungsgebiete eines 300-jährlichen Hochwassers sind wie der Rückgang der Fließgewässer eng mit dem Hochwasserrisiko verknüpft, da Hochwasserschutzbauwerke die mögliche Ausbreitung des Wassers eindämmen. In Österreich sind die meisten Hochwasserschutzprojekte auf 100-

jährliche Ereignisse dimensioniert (Unterlercher 2018). Daher ist anzunehmen, dass die Überflutungsgebiete 100-jährlicher Hochwässer wesentlich stärker reduziert wurden als jene 300-jährlicher Hochwässer. Bei Hochwässern mit Jährlichkeiten über 100 Jahren werden die meisten für HQ₁₀₀ ausgebauten Schutzsysteme überflutet. Durch kleinere verfügbare Überflutungsgebiete wird der Hochwasserrückhalt reduziert und damit die Hochwassergefahr generell erhöht (de Moel et al. 2015, Haidvogel et al. 2018, Wesemann et al. 2020).

Die Veränderung der Landbedeckung im Studiengebiet weist insgesamt sowohl abflusssteigernde wie auch abflussmindernde Faktoren auf. Der Rückgang von Ödland und Ackerland sowie der Zuwachs der Wälder im gesamten Einzugsgebiet haben eher eine abflussschwächende Wirkung. Durch den abflusssteigernden und beschleunigenden Einfluss der expandierten Siedlungsflächen; durch den Retentionsverlust, der durch den Rückgang von Feuchtgebieten und Fließgewässern sowie den generell kleineren Überflutungsflächen hervorgerufen wird; durch die geringere Pufferwirkung kleinerer Gletscherflächen; und durch den Rückgang der abflussschwächenden Waldflächen in den Überflutungsgebieten sind jedoch vermehrt Elemente, die den Hochwasserabfluss generell verstärken, vorhanden. Bei der isolierten Betrachtung der Landbedeckung kann daher davon ausgegangen werden, dass die gegenwärtige Hochwassergefahr im Einzugsgebiet der Mittleren Salzach größer ist als im 19. Jahrhundert.

Allerdings ist die Hochwassergeneration ein komplexer Prozess verschiedener Faktoren, mit stark variierenden Zeitskalen, die alle bis zu einem gewissen Grad von der Landnutzung beeinflusst werden, und somit die Analyse der Landbedeckungsänderung auf der Einzugsgebietsskala schwierig machen (Rogger et al. 2017). Eine absolute Aussage kann daher hier nicht getroffen werden, und eine solche Analyse bedarf weiterer Forschung.

8 ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Diese Masterarbeit beschäftigt sich mit der Landbedeckungsveränderung im Einzugsgebiet der Mittleren Salzach in Salzburg, Österreich, von 1830 bis 2016. Ein Fokus dieser Arbeit lag auf dem möglichen Einfluss der Landbedeckungsveränderung auf den Hochwasserabfluss und das Hochwasserrisiko in alpinen Tallagen. Dazu wurde Literaturrecherche betrieben, um Hintergrundinformationen zu Landbedeckung, deren historischer Entwicklung, und deren Einfluss auf Hochwässer zu finden. Anschließend wurde jeweils aus dem historischen Kartenmaterial – Franziszeischer Kataster und Franziszeische Landesaufnahme – und den aktuellen satellitengestützten Datensätzen – u.a. LISA Datensatz Level II von 2016, INVEKOS Datensatz und OpenStreetMap – Landbedeckungskarten in GIS erstellt. Zusätzlich dazu wurden auch die Hochwasserüberflutungsflächen 300-jährlicher Hochwässer ausgewiesen. Die Ergebnisse der Vergleiche der Landbedeckungskarten wurden jeweils für das gesamte Einzugsgebiet und die Überflutungszonen präsentiert, anschließend wurden Einzugsgebiet und Überflutungsgebiete verglichen und schließlich wurde über die Transformation der jeweiligen Landbedeckungsklassen in andere Klassen berichtet. Die abschließende Diskussion umfasste methodische Ungenauigkeiten und Interpretationsschwierigkeiten, die Überprüfung der Hypothesen, und die Folgen der Landbedeckungsveränderung für Abflussprozesse.

Die erste Forschungsfrage dieser Masterarbeit gilt den Veränderungen im gesamten untersuchten Einzugsgebiet der Mittleren Salzach zwischen 1830 und 2016. Die hierzu gefundenen Ergebnisse zeigen einen Rückgang von Ödland (- 35 %), Fließgewässerflächen (- 45 %), (Obst-)Baumwiesen (- 59 %), Gletscherflächen (- 86 %), Ackerflächen (-96 %), und historisch ausgewiesenen Feuchtgebieten (-99,96 %). Weiters konnte ein Zuwachs von Wäldern (+ 15 %), stehenden Gewässern (+ 46 %) und Grünland (+ 147 %) festgestellt werden. Siedlungsflächen, die ebenfalls anwuchsen (+ 490 %), zeigten dabei die deutlichste Veränderung und verfünffachten von 1830 bis 2016 ihre Flächen nahezu.

Die zweite Forschungsfrage, die sich auf die Unterschiede in der Landbedeckungsveränderung zwischen dem Einzugsgebiet und den Überflutungsgebieten 300-jährlicher Hochwässer bezieht, konnte folgendermaßen beantwortet werden: (Obst-)Baumwiesen (- 81 %) gingen stärker zurück als im Gesamtgebiet. Größere, historisch ausgewiesene Feuchtgebiete (- 100 %) verschwanden gänzlich aus den Überflutungsgebieten. Waldflächen (- 14 %) nahmen in Überflutungsgebieten gering ab. Siedlungsgebiete (+ 850 %) verzeichneten einen derart massiven Zuwachs in den Überflutungszonen, dass sie dort gegenwärtig mehr als achtmal so viel Fläche beanspruchen wie im Jahr 1830.

Die Veränderung der Landbedeckung berührt vielfältige sozioökonomische, ökologische und schutzwasserwirtschaftliche Aspekte. So hat der Rückgang der Feuchtgebiete nicht nur negativen Einfluss auf die Habitate von Flora und Fauna (Gleason et al. 2011, Hefting et al. 2013), sondern es leidet darunter auch die Nährstoffpufferkapazität einer Landschaft (Natho & Venohr 2014, Walton et al. 2020). Der Rückgang von Ackerflächen bei gleichzeitigem Anstieg von Grünlandflächen illustriert die allgemein abnehmende Bedeutung der Landwirtschaft als Haupterwerbstätigkeit im Alpenraum als Folge der Verschlechterung der sozioökonomischen Bedingungen für die Landwirtschaft (Tasser et al. 2007, Gubert 2008). Durch den flächigen

Anstieg der stehenden Gewässer wird der Einfluss der Wasserkraftwerke und ihrer Stauseen – mit all den Konsequenzen für Sedimenttransport, Habitatvorkommen, Hydrologie und Landschaftsbild (Szabó & Kiss 2014, Haidvogel et al. 2015, Powers et al. 2015, Mattmann et al. 2016) – im Studiengebiet dokumentiert.

Der mögliche Einfluss der Landbedeckungsveränderung auf den Hochwasserabfluss und das Hochwasserrisiko in alpinen Tallagen setzt sich aus vielfältigen Komponenten der Entwicklungen zusammen. Viele dieser Entwicklungen führen zusammengenommen vermutlich zu schnelleren Abflussgeschwindigkeiten und größeren Hochwasserspitzen, da sie geringere Niederschlagszwischenspeicherung (Rückgang der Gletscher), geringere Retentionsvolumina (Rückgang der Feuchtgebiete, der Fließgewässer und der gesamten Überflutungsgebiete), geringere Infiltrationsraten und beschleunigte Oberflächenabflüsse (Rückgang der Wälder in den Überflutungsgebieten und massive Zunahme der Siedlungsflächen) zur wahrscheinlichen Folge haben. Es konnten jedoch auch vermutlich abflussdämpfende Entwicklungen – der Rückgang von unbewachsenem Ödland und Ackerland sowie der Zuwachs der Wälder im gesamten Einzugsgebiet – festgestellt werden.

Dem signifikanten Rückgang von Fließgewässerflächen bei zeitgleicher massiver Zunahme von Siedlungsfläche kommt in diesem Zusammenhang besondere Bedeutung zu. Diese Entwicklungen illustrieren das Heranrücken der Siedlungen an die Gewässer, das durch jahrzehntelangen intensiven Hochwasserschutz ermöglicht wurde (Früh-Müller et al. 2015, Haidvogel et al. 2018). Diese Entwicklung führt zu einer Erhöhung der potenziellen Hochwasserschäden, da bei einem Versagen von Schutzbauten noch mehr ökonomische Werte gefährdet sind (Haidvogel 2008, Blöschl et al. 2015). In Zusammenhang mit dem Schrumpfen der Überflutungsgebiete steigt durch den damit verbundenen Retentionsverlust die Hochwassergefahr allgemein und besonders in noch nicht hochwassergeschützten Gebieten (de Moel et al. 2015, Haidvogel et al. 2018, Wesemann et al. 2020). Zudem lässt die Änderung der Landbedeckung in den Überflutungsgebieten seit 1830 generell auf höhere Abflussgeschwindigkeiten und damit größere Hochwasserspitzen schließen. Die Ergebnisse dieser Masterarbeit unterstützen somit die Schlussfolgerung, dass sich die Hochwassergefahr in alpinen Tallagen in den letzten beinahe 200 Jahren erhöht hat. In welchem Ausmaß, ist jedoch aufgrund teilweise entgegengesetzt wirksamer Prozesse schwer zu prognostizieren. Dazu bedarf es räumlich expliziter Wasserbilanzmodelle unter Einbeziehung von Klimadaten.

In Hinblick auf den Klimawandel gilt es, den Trend der Raumbeanspruchung durch die Menschen nicht weiter fortzusetzen, weniger Flächen zu versiegeln, mehr natürliche bzw. naturnahe Retentionsräume zu erhalten und stark verbaute Flüsse zu renaturieren.

9 LITERATURVERZEICHNIS

- Adlassnig, W., S. Wernitznig, and I. K. Lichtscheidl. 2011. Historic Copper Spoil Heaps in Salzburg/Austria: Geology, Mining History, Aspects of Soil Chemistry and Vegetation. Pages 201-231. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Arnold, S., R. Kurstedt, J. Riecken, and B. Schlegel. 2017. Paradigmenwechsel in der Landschaftsmodellierung— von der Tatsächlichen Nutzung hin zu Landbedeckung und Landnutzung. *zfv—Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*:142.
- Auerswald, K., P. Fiener, and R. Dikau. 2009. Rates of sheet and rill erosion in Germany — A meta-analysis. *Geomorphology (Amsterdam, Netherlands)* **111**:182-193.
- Banko, G., R. Grillmayer, S. Ortner, and C. Perger. 2010. LISA DATENMODELL - TEXTTEIL. Vers. 3.1. FH Wiener Neustadt, Wiener Neustadt.
- Bathurst, J. C., S. J. Birkinshaw, F. Cisneros, J. Fallas, A. Iroumé, R. Iturraspe, M. G. Novillo, A. Urciuolo, A. Alvarado, C. Coello, A. Huber, M. Miranda, M. Ramirez, and R. Sarandón. 2011. Forest impact on floods due to extreme rainfall and snowmelt in four Latin American environments 2: Model analysis. *Journal of hydrology (Amsterdam)* **400**:292-304.
- Beniston, M., and M. Stoffel. 2014. Assessing the impacts of climatic change on mountain water resources. *The Science of the total environment* **493**:1129-1137.
- Berendse, F., J. van Ruijven, E. Jongejans, and S. Keesstra. 2015. Loss of plant species diversity reduces soil erosion resistance. *Ecosystems* **18**:881-888.
- Bliss, A., R. Hock, and V. Radić. 2014. Global response of glacier runoff to twenty-first century climate change. *Journal of geophysical research. Earth surface* **119**:717-730.
- Blöschl, G., L. Gaál, J. Hall, A. Kiss, J. Komma, T. Nester, J. Parajka, R. A. P. Perdigão, L. Plavcová, M. Rogger, J. L. Salinas, and A. Viglione. 2015. Increasing river floods: fiction or reality?: Increasing river floods. *Wiley interdisciplinary reviews. Water* **2**:329-344.
- Blöschl, G., J. Hall, A. Viglione, R. A. P. Perdigão, J. Parajka, B. Merz, D. Lun, B. Arheimer, G. T. Aronica, A. Bilbashi, M. Boháč, O. Bonacci, M. Borga, I. Čanjevac, A. Castellarin, G. B. Chirico, P. Claps, N. Frolova, D. Ganora, L. Gorbachova, A. Gül, J. Hannaford, S. Harrigan, M. Kireeva, A. Kiss, T. R. Kjeldsen, S. Kohnová, J. J. Koskela, O. Ledvinka, N. Macdonald, M. Mavrova-Guirguinova, L. Mediero, R. Merz, P. Molnar, A. Montanari, C. Murphy, M. Osuch, V. Ovcharuk, I. Radevski, J. L. Salinas, E. Sauquet, M. Šraj, J. Szolgay, E. Volpi, D. Wilson, K. Zaimi, and N. Živković. 2019. Changing climate both increases and decreases European river floods. *Nature (London)* **573**:108-111.
- Blöschl, G., A. Kiss, A. Viglione, M. Barriendos, O. Brázdil, D. Coeur, G. Demaree, M. C. Llasat, N. Macdonald, D. Rets, L. Roald, P. Schmocker-Fackel, I. Amorim, M. Belenov, G. Benito, C. Bertolin, D. Camuffo, D. Cornel, R. Doktor, L. Elleder, S. Enzi, J. C. Garcia, R. Glaser, J. Hall, K. Haslinger, M. Hofstetter, J. Komma, D. Limanówka, D. V. Lun, A. Panin, J. Parajka, H. Petric, F. S. Rodrigo, C. Rohr, J. Schenbein, L. Schulte, L. P. Silva, W. H. J. Toonen, P. Valent, J. Waser, and O. Wetter. 2020. Current European flood-rich period exceptional compared with past 500 years. *Nature (London)* **583**:560-560.
- BMLFUW, B. f. L.-u. F., Umwelt u. Wasserwirtschaft. 2014. Hochwasserrisikozonierung Austria – HORA. Vienna.
- BMLFUW, B. f. L.-u. F., Umwelt u. Wasserwirtschaft, and B. f. A. u. B. BAB. 2017. INVEKOS-Datenpool 2017 des BMLFUW.in U. u. W. Bundesministerium für Land- u. Forstwirtschaft and B. f. A. u. Bergbauernfragen, editors., Vienna.
- Brázdil, R., Z. W. Kundzewicz, and G. Benito. 2010. Historical hydrology for studying flood risk in Europe. *Hydrological sciences journal* **51**:739-764.
- Breiling, M. 1993. Klimawandel und wintertourismus in Land Salzburg. *Klimawandel und Raumentwicklung*:107-116.
- Brierley, G., and M. Stankoviansky. 2003. Geomorphic responses to land use change. *Catena (Giessen)* **51**:173-179.
- Briner, S., C. Elkin, and R. Huber. 2013a. Evaluating the relative impact of climate and economic changes on forest and agricultural ecosystem services in mountain regions. *Journal of environmental management* **129**:414-422.
- Briner, S., R. Huber, P. Bebi, C. Elkin, D. R. Schmatz, and A. Grêt-Regamey. 2013b. Trade-Offs between Ecosystem Services in a Mountain Region. *Ecology and society* **18**:35.
- Bronstert, A., D. Niehoff, and G. Bürger. 2002. Effects of climate and land-use change on storm runoff generation: present knowledge and modelling capabilities. *Hydrological processes* **16**:509-529.

- Brown, A. E., L. Zhang, T. A. McMahon, A. W. Western, and R. A. Vertessy. 2005. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *Journal of hydrology (Amsterdam)* **310**:28-61.
- Buckel, J., and J.-C. Otto. 2018. The Austrian Glacier Inventory GI 4 (2015) in ArcGIS (shapefile) format. Supplement to: Buckel, Johannes; Otto, Jan-Christoph; Prasicek, Günther; Keuschnig, Markus (2018): Glacial lakes in Austria - Distribution and formation since the little Ice Age. *Global and Planetary Change*, 164, 39-51.
- BWV, B. 2014. Gefahrenzonenausweisung der Bundeswasserbauverwaltung. Darstellung der Gefährdungsbereiche. Grundlage für Alarmpläne und Hochwasserschutz-Maßnahmen. *in* B. Bundeswasserbauverwaltung, editor.
- Carnahan, E., J. M. Amundson, and E. Hood. 2019. Impact of glacier loss and vegetation succession on annual basin runoff. *Hydrology and Earth System Sciences* **23**:1667-1681.
- Cerdà, A., D. C. Flanagan, Y. le Bissonnais, and J. Boardman. 2009a. Soil erosion and agriculture. *Soil & tillage research* **106**:107-108.
- Cerdà, A., A. G. Morera, and M. B. Bodí. 2009b. Soil and water losses from new citrus orchards growing on sloped soils in the western Mediterranean basin. *Earth Surface Processes and Landforms: the Journal of the British Geomorphological Research Group* **34**:1822-1830.
- de Moel, H., B. Jongman, H. Kreibich, B. Merz, E. Penning-Rowsell, and P. J. Ward. 2015. Flood risk assessments at different spatial scales. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* **20**:865-890.
- De Niel, J., and P. Willems. 2019. Climate or land cover variations: what is driving observed changes in river peak flows? A data-based attribution study. *Hydrology and Earth System Sciences* **23**:871-882.
- Diolaiuti, G. A., D. Maragno, C. D'Agata, C. Smiraglia, and D. Bocchiola. 2011. Glacier retreat and climate change: Documenting the last 50 years of Alpine glacier history from area and geometry changes of Dosedè Piazzi glaciers (Lombardy Alps, Italy). *Progress in physical geography* **35**:161-182.
- Dousset, B., and F. Gourmelon. 2003. Satellite multi-sensor data analysis of urban surface temperatures and landcover. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing* **58**:43-54.
- Dudula, J., and T. O. Randhir. 2016. Modeling the influence of climate change on watershed systems: Adaptation through targeted practices. *Journal of hydrology (Amsterdam)* **541**:703-713.
- Dyrgerov, M. B., and M. F. Meier. 2005. Glaciers and the changing Earth system: a 2004 snapshot. Institute of Arctic and Alpine Research, University of Colorado Boulder.
- Egarter Vigl, L., U. Schirpke, E. Tasser, and U. Tappeiner. 2016. Linking long-term landscape dynamics to the multiple interactions among ecosystem services in the European Alps. *Landscape ecology* **31**:1903-1918.
- Feizizadeh, B., T. Blaschke, H. Nazmfar, E. Akbari, and H. R. Kohbanani. 2013. Monitoring land surface temperature relationship to land use/land cover from satellite imagery in Maraqeh County, Iran. *Journal of Environmental Planning and Management* **56**:1290-1315.
- Fischer, A., T. Fickert, G. Schweizer, G. Patzelt, and G. Gross. 2019. Vegetation dynamics in Alpine glacier forelands tackled from space. *Scientific reports* **9**:13918-13918.
- Frey, S. 2015. Possible impacts of climate change on the water balance with special emphasis on runoff and hydropower potential.
- Früh-Müller, A., A. Früh-Müller, M. Wegmann, M. Wegmann, T. Koellner, and T. Koellner. 2015. Flood exposure and settlement expansion since pre-industrial times in 1850 until 2011 in north Bavaria, Germany. *Regional Environmental Change* **15**:183-193.
- Gaál, L., J. Szolgay, S. Kohnová, J. Parajka, R. Merz, A. Viglione, and G. Blöschl. 2012. Flood timescales: Understanding the interplay of climate and catchment processes through comparative hydrology. *Water resources research* **48**:n/a-n/a.
- Gellrich, M., P. Baur, B. Koch, and N. E. Zimmermann. 2007. Agricultural land abandonment and natural forest re-growth in the Swiss mountains: A spatially explicit economic analysis. *Agriculture, ecosystems & environment* **118**:93-108.
- GeoVille. 2012. Land Information System Austria. Standardisiertes Monitoring der Landbedeckung und Landnutzung in Österreich. *in* G. Gmb, editor., Innsbruck.
- GeoVilleInformationSystems. 2017. cadasterenv – Final Report (TD-9) – Public Version I 1.0., GeoVilleInformation Systems GmbH, Vienna.
- Gimmi, U., T. Lachat, and M. Bürgi. 2011. Reconstructing the collapse of wetland networks in the Swiss lowlands 1850–2000. *Landscape ecology* **26**:1071-1083.
- Gingrich, S., S. Gingrich, G. Haidvogel, G. Haidvogel, F. Krausmann, and F. Krausmann. 2012. The Danube and Vienna: urban resource use, transport and land use 1800–1910. *Regional Environmental Change* **12**:283-294.

- Gleason, R. A., N. H. Euliss, B. A. Tangen, M. K. Laubhan, and B. A. Browne. 2011. USDA conservation program and practice effects on wetland ecosystem services in the Prairie Pothole Region. *Ecological Applications* **21**:S65-S81.
- Grêt-Regamey, A., P. Bebi, I. D. Bishop, and W. A. Schmid. 2008. Linking GIS-based models to value ecosystem services in an Alpine region. *Journal of environmental management* **89**:197-208.
- Grillakis, M. G., A. G. Koutroulis, J. Komma, I. K. Tsanis, W. Wagner, and G. Blöschl. 2016. Initial soil moisture effects on flash flood generation – A comparison between basins of contrasting hydro-climatic conditions. *Journal of hydrology (Amsterdam)* **541**:206-217.
- Grillmayer, R., G. Banko, J. Scholz, C. Perger, K. Steinnocher, A. Walli, and J. Weichselbaum. 2010. Land Information System Austria (LISA): Objektorientiertes Datenmodell zur Abbildung der Landbedeckung und Landnutzung. *Angewandte Geoinformatik*:616-621.
- Gubert, F. 2008. Structural adjustment in agriculture and landscape change: three case study communities in Trentino's mountain areas (Italian Alps).
- Haidvogel, G. 2008. Von der Flusslandschaft zum Fließgewässer. Die Entwicklung ausgewählter österreichischer Flüsse im 19. und 20. Jahrhundert mit besonderer Berücksichtigung der Kolonisierung des Überflutungsraums. Universität Wien, Wien.
- Haidvogel, G., J. Eberstaller, D. Eberstaller-Fleischanderl, B. Fraiße, H. Gabriel, and S. Hohensinner. 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.
- Haidvogel, G., D. Lajus, D. Pont, M. Schmid, M. Jungwirth, and J. Lajus. 2014. Typology of historical sources and the reconstruction of long-term historical changes of riverine fish: a case study of the Austrian Danube and northern Russian rivers. *Ecology of freshwater fish* **23**:498-515.
- Haidvogel, G., D. Pont, H. Dolak, and S. Hohensinner. 2015. Long-term evolution of fish communities in European mountainous rivers: past log driving effects, river management and species introduction (Salzach River, Danube). *Aquatic Sciences* **77**:395-410.
- Hefting, M. M., R. N. van den Heuvel, and J. T. A. Verhoeven. 2013. Wetlands in agricultural landscapes for nitrogen attenuation and biodiversity enhancement: Opportunities and limitations. *Ecological Engineering* **56**:5-13.
- Hein, T., A. Funk, F. Pletterbauer, W. Graf, I. Zsuffa, G. Haidvogel, R. Schinegger, and G. Weigelhofer. 2019. Management challenges related to long-term ecological impacts, complex stressor interactions, and different assessment approaches in the Danube River Basin. *River Research and Applications* **35**:500-509.
- Hodgkins, G. A., P. H. Whitfield, D. H. Burn, J. Hannaford, B. Renard, K. Stahl, A. K. Fleig, H. Madsen, L. Mediero, J. Korhonen, C. Murphy, and D. Wilson. 2017. Climate-driven variability in the occurrence of major floods across North America and Europe. *Journal of hydrology (Amsterdam)* **552**:704-717.
- Hohensinner, S., U. Atzler, M. Berger, T. Bozzetta, C. Höberth, M. Kofler, L. Rapottnig, Y. Sterle, and G. Haidvogel. in Bearb. Land use and cover change in the industrial era: a spatial analysis of three Alpine river catchments and fluvial corridors.
- Holzmann, H., T. Lehmann, H. Formayer, and P. Haas. 2010. Auswirkungen möglicher Klimaänderungen auf Hochwasser und Wasserhaushaltskomponenten ausgewählter Einzugsgebiete in Österreich. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* **62**:7-14.
- Horn, R., and K. Richards. 2007. Flow–Vegetation Interactions in Restored Floodplain Environments. in P. J. Wood, D. M. Hannah, and J. P. Sadler, editors. *Hydroecology and Ecohydrology: Past, Present and Future*. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester.
- Hughes, F. M. R., M. G. del Tánago, and J. O. Mountford. 2012. Restoring Floodplain Forests in Europe. Pages 393-422. Springer Netherlands, Dordrecht.
- Huss, M. 2011. Present and future contribution of glacier storage change to runoff from macroscale drainage basins in Europe. *Water resources research* **47**:n/a-n/a.
- Jansson, P., R. Hock, and T. Schneider. 2003. The concept of glacier storage: a review. *Journal of hydrology (Amsterdam)* **282**:116-129.
- Jepsen, M. R., T. Kuemmerle, D. Müller, K. Erb, P. H. Verburg, H. Haberl, J. P. Vesterager, M. Andrič, M. Antrop, G. Austrheim, I. Björn, A. Bondeau, M. Bürgi, J. Bryson, G. Caspar, L. F. Cassar, E. Conrad, P. Chromý, V. Daugirdas, V. Van Eetvelde, R. Elena-Rosselló, U. Gimmi, Z. Izakovicova, V. Jančák, U. Jansson, D. Kladnik, J. Kozak, E. Konkoly-Gyuró, F. Krausmann, Ü. Mander, J. McDonagh, J. Pärn, M. Niedertscheider, O. Nikodemus, K. Ostapowicz, M. Pérez-Soba, T. Pinto-Correia, G. Ribokas, M. Rounsevell, D. Schistou, C. Schmit, T. S. Terkenli, A. M. Tretvik, P. Trzepak, A. Vadineanu, A. Walz, E. Zhllima, and A. Reenberg. 2015. Transitions in European land-management regimes between 1800 and 2010. *Land use policy* **49**:53-64.

- k.k. Landesregierung im Erzherzogtum Österreich unter der Enns. 1824. Instruction zur Ausführung der zum Behufe des allgemeinen Catasters in Folge des 8ten und 9ten Paragraphes des Allerhöchsten Patents vom 23. December 1817 angeordneten Landes=Vermessung.*in* k. k. L. i. E. Ö. u. d. Enns, editor. k.k. Hof- und Staats-Aerial-Druckerey, Wien.
- Kundzewicz, Z. W. 2015. Climate change track in river floods in Europe. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences* **369**:189-194.
- Kundzewicz, Z. W., V. Krysanova, R. Dankers, Y. Hirabayashi, S. Kanae, F. F. Hattermann, S. Huang, P. C. D. Milly, M. Stoffel, P. P. J. Driessen, P. Matczak, P. Quevauviller, and H. J. Schellnhuber. 2016. Differences in flood hazard projections in Europe – their causes and consequences for decision making. *Hydrological sciences journal* **62**:1-14.
- Lange, G., and K. Lecher. 1993. *Hydraulische Grundlagen*. Pages 65-112 *Gewässerregulierung Gewässerpflege*. Springer.
- Lehner, B. L. 2006. Auswirkungen des globalen Wandels auf die Wasserressourcen und die Hydrologie Europas.
- Löschner, L., M. Herrnegger, S. Hohensinner, K. Lebedzinski, J. Niedermayr, R. Nordbeck, W. Seher, K. Wagner, and J. Wesemann. 2019a. Flood risk management in mountain regions: a policy coordination perspective.*in* V. B. University of Natural Resources and Life Sciences and R. a. M. R. A. F. M. f. S. a. T. B. Federal Institute of Agricultural Economics, editors.
- Löschner, L., M. Herrnegger, S. Hohensinner, J. Niedermayr, R. Nordbeck, W. Seher, K. Wagner, and J. Wesemann. 2019b. Flood risk management in mountain regions: a policy coordination perspective.*in* *Geophysical Research Abstracts*.
- Markart, B., B. Kohl, B. Sotier, T. Schauer, G. Bunza, and R. Stern. 2004. Provisorische Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes auf alpinen Boden-/Vegetationseinheiten bei konvektiven Starkregen (Version 1.0).*in* B. u. F. f. Wald, editor. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.
- Marshall, S. 2014. Climate change. Glacier retreat crosses a line. *Science (American Association for the Advancement of Science)* **345**:872-872.
- Mattmann, M., I. Logar, and R. Brouwer. 2016. Hydropower externalities: A meta-analysis. *Energy economics* **57**:66-77.
- Mayor, Á. G., S. Bautista, and J. Bellot. 2009. Factors and interactions controlling infiltration, runoff, and soil loss at the microscale in a patchy Mediterranean semiarid landscape. *Earth Surface Processes and Landforms* **34**:1702-1711.
- McGrath, M., S. Luyssaert, P. Meyfroidt, J. O. Kaplan, M. Bürgi, Y. Chen, K. Erb, U. Gimmi, D. McInerney, and K. Naudts. 2015. Reconstructing European forest management from 1600 to 2010. *Biogeosciences* **12**:4291-4316.
- Merz, R., and G. Blöschl. 2009. A regional analysis of event runoff coefficients with respect to climate and catchment characteristics in Austria. *Water resources research* **45**:W01405-n/a.
- Monteiro, A. T., F. Fava, E. Hiltbrunner, G. Della Marianna, and S. Bocchi. 2011. Assessment of land cover changes and spatial drivers behind loss of permanent meadows in the lowlands of Italian Alps. *Landscape and urban planning* **100**:287-294.
- Muhar, S., B. Grüner, K. Böck, S. Scheikl, and R. Becsi. 2018. SPARE synthesis report: Balancing river protection needs, ecosystem functions and human uses. European Regional Development Fund (ERDF) – Interreg Alpine Space **31**.
- Murray, V., and K. L. Ebi. 2012. IPCC Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation (SREX). *Journal of epidemiology and community health (1979)* **66**:759-760.
- Mutiibwa, D., A. Kilic, and S. Irmak. 2014. The effect of land cover/land use changes on the regional climate of the USA high plains. *Climate (Basel)* **2**:153-167.
- Natho, S., and M. Venohr. 2014. Active versus potential floodplains—the effect of small flood events on nutrient retention along the river Elbe corridor (Germany). *Aquatic Sciences* **76**:633-642.
- Naudascher, E. 1987. *Hydraulik der Gerinne und Gerinnebauwerke*. Springer.
- Niehoff, D. 2002. Modellierung des Einflusses der Landnutzung auf die Hochwasserentstehung in der Mesoskala.
- Nunes, A. N., A. C. de Almeida, and C. O. A. Coelho. 2011. Impacts of land use and cover type on runoff and soil erosion in a marginal area of Portugal. *Applied geography (Sevenoaks)* **31**:687-699.
- Oerlemans, J. 2005. Extracting a climate signal from 169 glacier records. *Science* **308**:675-677.
- Pasche, E., and W. Ploeger. 2004. Retention effect by natural rivers with riparian forest. Pages 399-406 *Hydroinformatics: (In 2 Volumes, with CD-ROM)*. World Scientific.
- Patt, H. 2016. *Fließgewässer- und Auenentwicklung: Grundlagen und Erfahrungen*. Springer Berlin / Heidelberg, Berlin, Heidelberg.

- Pestal, G., and E. Hejl. 2005. Geologische Karte von Salzburg 1:200.000. Verlag der Geologischen Bundesanstalt, Wien.
- Pflanzl, T. 2015. Perspektiven einer nachhaltigen Energiezukunft der Alpenländer. Pages 17-22. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
- Powers, S. M., J. L. Tank, and D. M. Robertson. 2015. Control of nitrogen and phosphorus transport by reservoirs in agricultural landscapes. *Biogeochemistry* **124**:417-439.
- Probeck, M., A. Colgan, T. Krimly, M. Zarate, and K. Schneider. 2006. Landbedeckung und Landnutzung - Teilprojekt Koordination. *in* G.-D. Projekt and L.-M.-U. München, editors. Global Change Atlas – Einzugsgebiet Obere Donau. Ludwig-Maximilians-Universität München, München.
- Ramm, F. 2019. OpenStreetMap Data in Layered GIS Format.
- Richardson, C. J., N. E. Flanagan, M. Ho, and J. W. Pahl. 2011. Integrated stream and wetland restoration: A watershed approach to improved water quality on the landscape. *Ecological Engineering* **37**:25-39.
- Rogger, M., M. Agnoletti, A. Alaoui, J. C. Bathurst, G. Bodner, M. Borga, V. Chaplot, F. Gallart, G. Glatzel, J. Hall, J. Holden, L. Holko, R. Horn, A. Kiss, S. Kohnová, G. Leitinger, B. Lennartz, J. Parajka, R. Perdigão, S. Peth, L. Plavcová, J. N. Quinton, M. Robinson, J. L. Salinas, A. Santoro, J. Szolgay, S. Tron, J. J. H. van den Akker, A. Viglione, and G. Blöschl. 2017. Land use change impacts on floods at the catchment scale: Challenges and opportunities for future research. *Water resources research* **53**:5209-5219.
- Rohr, C. 2019. Zum Umgang mit schweren Hochwassern an der unteren Salzach und am unteren Inn seit dem späten Mittelalter.
- Schober, B., B. Schober, C. Hauer, C. Hauer, H. Habersack, and H. Habersack. 2015. A novel assessment of the role of Danube floodplains in flood hazard reduction (FEM method). *Natural Hazards* **75**:33-50.
- Silva, J. S., R. M. d. Silva, and C. A. G. Santos. 2018. Spatiotemporal impact of land use/land cover changes on urban heat islands: A case study of Paço do Lumiar, Brazil. *Building and environment* **136**:279-292.
- Sivapalan, M., G. Blöschl, R. Merz, and D. Gutknecht. 2005. Linking flood frequency to long-term water balance: Incorporating effects of seasonality. *Water resources research* **41**:W06012-n/a.
- Skublics, D., G. Blöschl, and P. Rutschmann. 2016. Effect of river training on flood retention of the Bavarian Danube. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* **64**:349-356.
- Smith, R. M., K. J. Gaston, P. H. Warren, and K. Thompson. 2005. Urban domestic gardens (V): relationships between landcover composition, housing and landscape. *Landscape ecology* **20**:235-253.
- Sterle, Y. *in* Bearb. Historical change of the land cover in the catchment of the upper Salzach River (Salzburg). University of Natural Resources and Life Sciences Vienna.
- Sun, Q., Z. Wu, and J. Tan. 2012. The relationship between land surface temperature and land use/land cover in Guangzhou, China. *Environmental Earth Sciences* **65**:1687-1694.
- Szabó, M., and Á. Kiss. 2014. Effects of renewable energy resources on the landscape. *Hungarian Geographical Bulletin* **63**:5-16.
- Tappeiner, U., E. Tasser, G. Leitinger, and G. Tappeiner. 2020. Landnutzung in den Alpen: historische Entwicklung und zukünftige Szenarien. na.
- Tasser, E., G. Leitinger, and U. Tappeiner. 2017. Climate change versus land-use change—What affects the mountain landscapes more? *Land use policy* **60**:60-72.
- Tasser, E., J. Walde, U. Tappeiner, A. Teutsch, and W. Noggler. 2007. Land-use changes and natural reforestation in the Eastern Central Alps. *Agriculture, ecosystems & environment* **118**:115-129.
- Thober, S., R. Kumar, N. Wanders, A. Marx, M. Pan, O. Rakovec, L. Samaniego, J. Sheffield, E. F. Wood, and M. Zink. 2018. Multi-model ensemble projections of European river floods and high flows at 1.5, 2, and 3 degrees global warming. *Environmental Research Letters* **13**:014003.
- Unterlercher, M. 2018. Hochwasserrisikomanagement in Österreich. Ziele – Maßnahmen – Beispiele. Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus.
- Vincent, C., D. Six, and E. Le Meur. 2007. Climate change impact on glacier mass balance over the 20 super(th) Century in the Alps. *Geophysical Research Abstracts*.
- Walton, C. R., D. Zak, J. Audet, R. J. Petersen, J. Lange, C. Oehmke, W. Wichtmann, J. Kreyling, M. Grygoruk, E. Jabłońska, W. Kotowski, M. M. Wiśniewska, R. Ziegler, and C. C. Hoffmann. 2020. Wetland buffer zones for nitrogen and phosphorus retention: Impacts of soil type, hydrology and vegetation. *The Science of the total environment* **727**:138709.
- Walz, U., B. Richter, and K. Grunewald. 2019. Indicators on the ecosystem service “regulation service of floodplains”. *Ecological indicators* **102**:547-556.
- Wesemann, J., M. Eder, H. Habersack, K. Hogl, L. Loeschner, R. Nordbeck, P. Scherhauer, B. Schober, W. Seher, and N. Zahnt. 2020. Regional development of flood risk under consideration of future development. *HYDROLOGIE UND WASSERBEWIRTSCHAFTUNG* **64**:110-126.

- Wheater, H., and E. Evans. 2009. Land use, water management and future flood risk. *Land use policy* **26**:S251-S264.
- Wiesbauer, H. 1999. Gewässermorphologie der Salzach im Wandel der Zeit. *Laufener Seminarbeitr.* **5/99**:25-39.
- Wimmer, R., H. Wintersberger, and G. A. Parthl. 2012. *Große Flüsse*. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.
- WLW, F. D. f. W.-u. L., and B. f. L.-u. F. BMLFUW, Umwelt u. Wasserwirtschaft. 2011. *Richtlinie für die Gefahrenzonenplanung*.
- Wolf, A., A. Wolf, P. Lazzarotto, P. Lazzarotto, H. Bugmann, and H. Bugmann. 2012. The relative importance of land use and climatic change in Alpine catchments. *Climatic Change* **111**:279-300.
- Yang, Q., H. Tian, M. A. M. Friedrichs, M. Liu, X. Li, and J. Yang. 2015. Hydrological Responses to Climate and Land-Use Changes along the North American East Coast: A 110-Year Historical Reconstruction. *Journal of the American Water Resources Association* **51**:47-67.

10 ABBILDUNGS- UND TABELLENVERZEICHNIS

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung	Seite	Quelle
Abbildung 1	13	Eigene Grafik, basierend auf http://www.geoland.at/
Abbildung 2	14	Eigene Grafik, basierend auf http://www.geoland.at/
Abbildung 3	14	Eigene Grafik, basierend auf http://www.geoland.at/
Abbildung 4	19	k.k. Landesregierung im Erzherzogtum Österreich unter der Enns (1824)
Abbildung 5	24	Eigene Grafik
Abbildung 6	25	[1] https://mapire.eu/de/map/cadastral (vgl. BEV Katastralmappenarchiv) [2] http://www.geoland.at/ [3] Eigene Grafik [4] Eigene Grafik
Abbildung 7	27	Eigene Grafik
Abbildung 8	27	Eigene Grafik
Abbildung 9	28	Eigene Grafik
Abbildung 10	29	[links] Eigene Grafik, basierend auf https://mapire.eu/de/map/cadastral (vgl. BEV Katastralmappenarchiv) [rechts] Eigene Grafik und
Abbildung 11	29	[links] Eigene Grafik, basierend auf https://mapire.eu/de/map/cadastral (vgl. BEV Katastralmappenarchiv) [rechts] Eigene Grafik, basierend auf http://www.geoland.at/
Abbildung 12	31	Eigene Grafik
Abbildung 13	31	Eigene Grafik
Abbildung 14	32	Eigene Grafik
Anhang 1	52	Eigene Grafik
Anhang 2	52	Eigene Grafik
Anhang 3	53	Eigene Grafik
Anhang 4	54	Eigene Grafik
Anhang 5	54	Eigene Grafik
Anhang 9	55	Eigene Grafik
Anhang 10	55	Eigene Grafik

TABELLENVERZEICHNIS

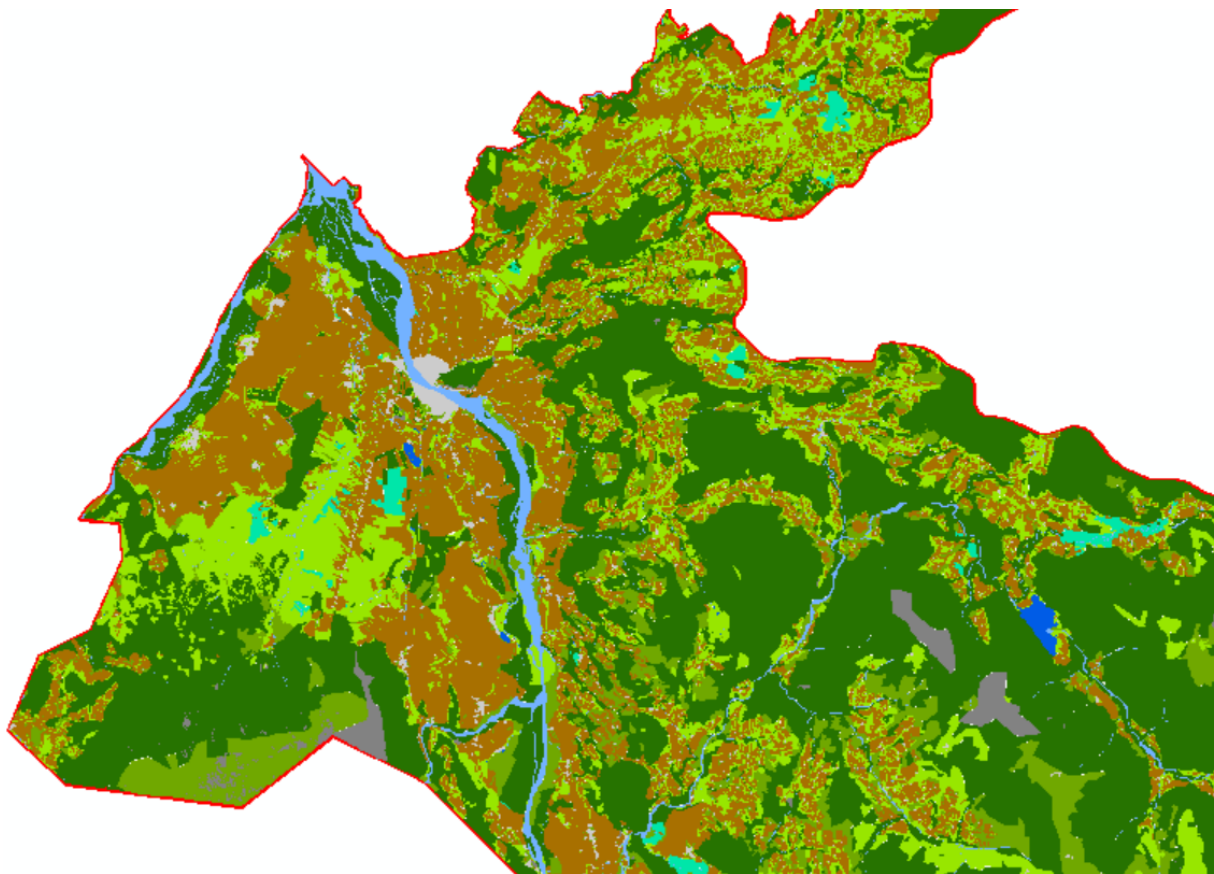
Tabelle	Seite
Tabelle 1	18
Tabelle 2	20
Tabelle 3	23
Tabelle 4	26
Tabelle 5	30
Tabelle 6	34

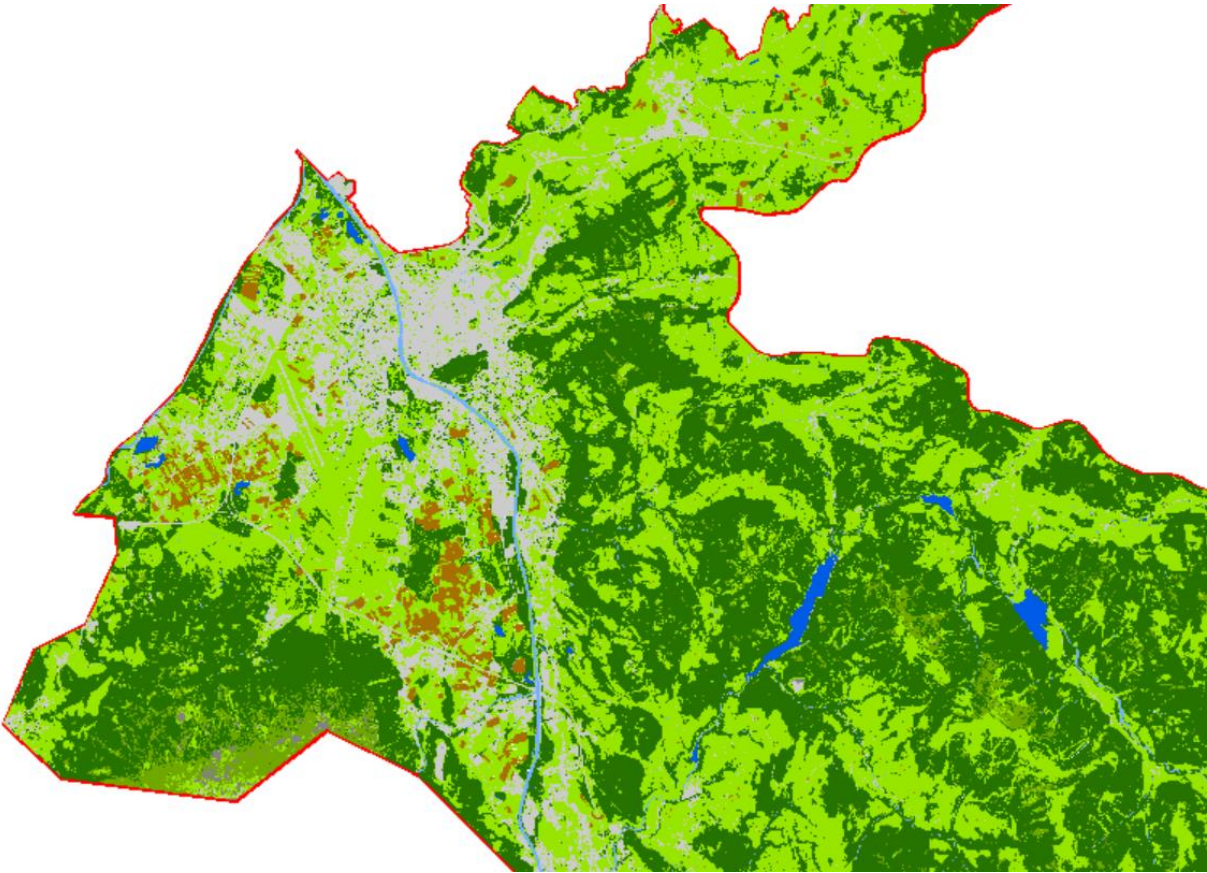
11 ANHANG

Anhang 1 | Legende der Landbedeckungskarten

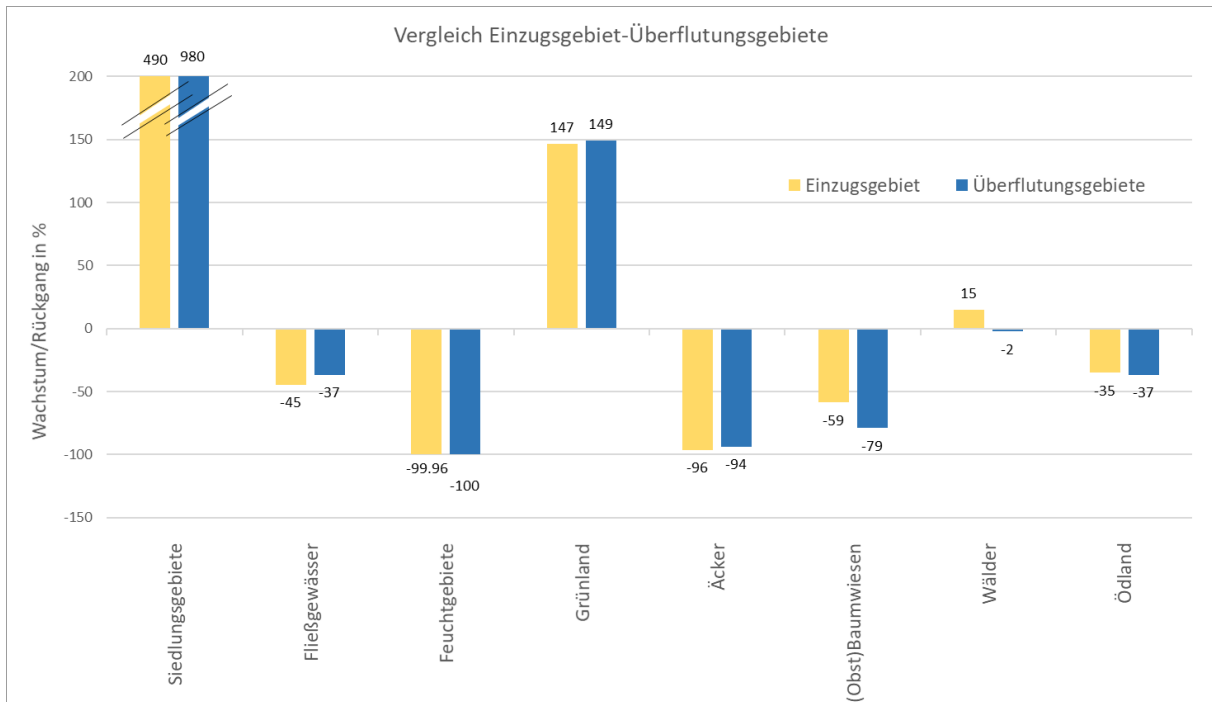
- Siedlungsgebiete
- Fließgewässer
- stehende Gewässer
- Feuchtgebiete
- Grünland
- Äcker
- Weingärten
- (Obst)baumwiesen
- Wälder
- Ödland
- Gletscher

Anhang 2 | Abbildung | Landbedeckung im Großraum Salzburg 1830

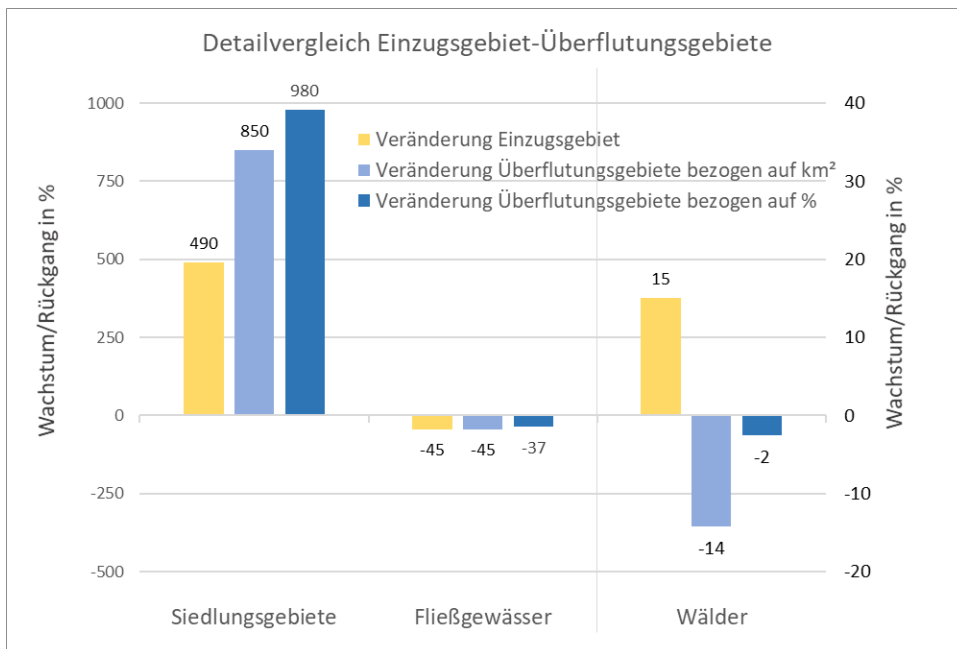




Anhang 4 | Abbildung | Entwicklung der einzelnen Landbedeckungsklassen von 1830 bis 2016 im Vergleich zwischen dem Einzugsgebiet und den Überflutungsgebieten, bezogen auf den Anteil der jeweiligen Gebiete in %



Anhang 5 | Abbildung | Gegenüberstellung des Einflusses der Bezugsgrößen auf den Vergleich der Landbedeckungsveränderungen



Abhängig von der gewählten Vergleichsgröße – entweder der prozentuelle Anteil an den Gebieten im jeweiligen Jahr (%), oder die absolute akkumulierte Größe der Landbedeckungsklasse im jeweiligen Jahr (km²) – können leicht variierende Aussagen getroffen werden. Anhang 4 gibt, als Gegenstück zu Abbildung 14, den Vergleich von Gesamteinzugsgebiet zu Überflutungsflächen bezogen auf den prozentuellen Anteil der Klassen an den Gebieten wieder. Anhang 5 soll den Einfluss der Vergleichsgrößen verdeutlichen, indem die im Text angesprochenen Beispiele Siedlungsgebiete, Fließgewässer und Wälder jeweils mit beiden Bezugsgrößen dargestellt werden. Da das Gesamteinzugsgebiet keiner Größenveränderung unterworfen war, sind hier die Werte für Veränderung bezogen auf Prozentanteile und Veränderungen bezogen auf Flächenwerte ident.

Anhang 7 | Tabelle | Transformationen der Landbedeckungsklassen in km²

in km ²	Siedlungs- gebiete	Fließ- gewässer	stehende Gewässer	Feucht- gebiete	Grünland	Äcker	(Obst-) Baumwiesen	Wälder	Ödland	Gletscher
Siedlungsgebiete	4,7*	3,4*	0,0	0,8*	10,2*	33,5*	5,0*	8,4*	0,3*	0,02*
Fließgewässer	0,0	8,8	0,0	0,1	1,5	0,4	1,6	3,1	0,1	0,0
stehende Gewässer	0,0	0,5	4,2	0,1	0,6	0,3	0,4	0,9	0,1	0,0
Feuchtgebiete	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Grünland	5,8*	7,1	0,4	10,5	256,9	236,1	232,5	97,2	57,0	0,2
Äcker	0,0	0,1	0,0	0,1	1,6	7,7	0,5	1,0	0,0	0,0
(Obst-)Baumwiesen	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Wälder	0,1*	0,8	0,1	0,5	22,8	0,9	69,9	84,1	38,9	0,0
Ödland	0,7*	7,3	0,1	2,0	72,7	10,1	218,2	670,6	13,5	0,0
Gletscher	0,0*	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	160,2	15,2
	11,3*	27,9	4,9	14,2	366,3	289,0	528,1	865,3	270,0	15,5

* Durch die methodischen Schwierigkeiten stellen diese Werte vermutlich nicht die wahren Werte dar. So müssten alle Transformationen von Siedlungsgebieten in andere Landbedeckungsklassen kleiner ausfallen als hier angegeben und alle Transformationen von anderen Landbedeckungsklassen in Siedlungsgebiete müssten größer ausfallen.

