

# Publizierbarer Endbericht

# A) Projektdaten

Allgemeines zum Projekt			
Kurztitel:	HiFlow-CMA		
Langtitel:	High Resolution Flood Risk Assessment for Climate Change Adaptation with a Coupled Modelling Ap- proach		
Zitiervorschlag:	Schneeberger, K.; Winter, B.; Huttenlau, M.; Pazur, R.; von Stackelberg, M.; Georges, C.; Soder, N.; Förster, K.; Achleitner, S.; Bolliger, J. (2020): Flood Risk Assessment for Climate Change Adaptation. Austrian Research Programme (Project Nr.: B566355), Final Report.		
Programm inkl. Jahr:	ACRP 8th Call		
Dauer:	01.09.2016 bis 31.12.2019		
KoordinatorIn/ ProjekteinreicherIn:	Universität Innsbruck, Institut für Geographie (Tirol, AT)		
Kontaktperson Name:	DiplIng. Klaus Schneeberger, PhD		
Kontaktperson Ad- resse:	Innrain 52f, 6020 Innsbruck		
Kontaktperson Tele- fon:	+43 512 39 2929 49		
Kontaktperson E-Mail:	Klaus.Schneeberger@uibk.ac.at		
Projekt- und Kooperations- partnerIn:	Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaften WSL, Birmensdorf (Zürich, CH) Universität Innsbruck, Institut für Infrastruktur, Ar-		
parenerim	beitsbereich Wasserbau, (Tirol, AT)		
Schlagwörter:	Hochwasserrisiko, Landnutzungsänderungen, Klimawandel, Anpassungsmaßnahmen		
Projektgesamtkosten:	EUR 310.293,		
Fördersumme:	EUR 299.664,		
Klimafonds-Nr:	B566355		
Erstellt am:	31.03.2020		



# B) Projektübersicht

# 1 Kurzfassung

Klima- und Landnutzungsänderungen stellen zunehmende Herausforderungen für das Hochwasserrisikomanagement dar. Veränderungen der Frequenz und Magnitude von Hochwasserereignissen, in immer dichter besiedelten Gebieten, erfordern Anpassungen der Risikomanagementstrategien. Das Projekt HiFlow-CMA geht der Frage nach, wie sich das zukünftige Hochwasserrisiko in Folge von Klima- und Landnutzungsänderungen verändern könnte und welchen Beitrag Anpassungsmaßnahmen für ein effektives Hochwasserrisikomanagement leisten können. Das Österreichische Bundesland Vorarlberg dient dabei als Pilotregion der Studie.

Zur Bestimmung des Hochwasserrisikos ist eine Vielzahl unterschiedlicher Aspekte zu berücksichtigen. Das Risiko setzt sich aus der Gefährdung durch Überschwemmungen, der Exposition und Vulnerabilität der Risikoelemente und der Eintrittswahrscheinlichkeit von Schadensereignissen zusammen. Um eine möglichst integrale Betrachtung zukünftiger Entwicklungen zu gewährleisten, wurden Klimaszenarien (ÖKS15) aufbereitet. Um das veränderte Abflussverhalten betroffener Flusssysteme zu analysieren, wurden räumlich explizite Landnutzungsszenarien berechnet und mögliche Anpassungsmaßnahmen berücksichtigt. Diese bilden die fortschreitende Entwicklung des Risikopotenzials ab und werden zudem auch für die hydrologische Betrachtung herangezogen. Da die Länge der Zeitreihen nicht ausreicht, um statistisch belastbare Aussagen über das Hochwasserrisiko zu treffen, wurden auf Basis der Simulationsergebnisse lange Zeitreihen von räumlich plausiblen Hochwasserereignissen generiert und statistisch ausgewertet. Zusätzlich wurden mögliche Anpassungsmaßnahmen zur Reduktion des Hochwasserrisikos in Form von Raumplanungs- sowie Objektschutzmaßnahmen berücksichtigt.

Die Ergebnisse von HiFlow-CMA zeigen, dass das Hochwasserrisiko in Vorarlberg in Zukunft wahrscheinlich ansteigen wird. Aufgrund der komplexen Modellstruktur, der Vielzahl an betrachteten Prozessen und den Unsicherheiten der einzelnen Teilaspekte sind diese Resultate mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Insbesondere die Aussagen bezüglich zukünftiger Extremniederschläge sind wenig robust. Dieser Aspekt wirkt sich auf die Risikobewertung aus und zeigt sich durch eine geringe Übereinstimmung unterschiedlicher Klimamodellsimulationen. Die ausgewerteten Landnutzungsszenarien zeigen einen systematischen Anstieg des Risikopotenzials durch anhaltende Siedlungsentwicklung. Bereits heute bestehen weitreichende raumplanerischen Einschränkungen für die Entwicklung neuer Infrastruktur und Siedlungsgebiete. Diese gesetzlichen Vorgaben haben eine mindernde Wirkung auf das zukünftige Hochwasserrisiko indem sie eine Bebauung in besonders gefährdeten Bereichen verhindern. Eine Aufweichung dieser Bestimmungen würde zu einer Steigerung des Hochwasserrisikos führen. Aufgrund der Unsicherheiten in der Risikoauswertung sind sogenannte "non-regret" Maßnahmen im Hochwasserrisikomanagement sinnvoll.



# 2 Executive Summary

Flood events regularly affect millions of people and cause major economic damage in many regions. Possible changes in the frequency and magnitude of flood events in increasingly densely populated areas require adjustments in risk management strategies. The project HiFlow-CMA investigates how future flood risk evolves as a result of climate and land use changes. Further, it evaluates the potential of adaptation measures to effectively reduce flood risk. The study is conducted in the Austrian province of Vorarlberg.

Undoubtedly, the determination of flood risk is a complex task. The European Flood Directive defines flood risk as the product of the probability of a flood event (hazard) and the severity of its consequences (exposure and vulnerability). In order to analyse possible future drivers of flood risk, a coupled modelling approach considering climate and land use scenarios was developed. The ÖKS15 climate scenarios were applied to simulate future climate. In a participatory process, spatially explicit land use scenarios representing possible future land cover were developed. The land use scenarios primarily describe the changes of damage potential. Additionally, the results of the land use modelling served as an input for the hydrological simulations. Since the length of available time series were not sufficient for reliable risk estimation, long time series of spatially plausible flood events were generated and statistically evaluated. In addition, the effect of possible adaptation scenarios, comprising spatial planning and object protection measures, was analysed. For analysing the temporal development of flood risk three time periods were defined; namely a reference period, a "Near Future" period, and finally a "Far Future" period. The development and application of the methodology in the Province of Vorarlberg can be considered as a proof-of-concept study and is transferable to other regions in Austria and elsewhere.

The project results show that flood risk in the study area will likely increase in the future. Future precipitation conditions and especially precipitation extremes are, however, associated with large uncertainties. These uncertainties are directly transferred to the risk assessment. The evaluation of land use scenarios shows a clear signal towards increasing risk potential. The main driver for this development is the continued urbanisation in flood prone valley locations. The analysed spatial adaptation measures are valuable instruments in flood risk management. Existing spatial planning restrictions for the development of new infrastructure and settlement areas are already effective to reduce the risk potential. A theoretical softening of the restrictions shows a significant increase of future flood damage. To cope with the high uncertainty of future flood risk, "non-regret" measures are advisable in flood risk management.



# 3 Hintergrund und Zielsetzung

In den letzten Jahrzehnten kam es in Europa immer wieder zu verheerenden Hochwasserereignissen. Diese betrafen Millionen von Menschen und führten zu erheblichen wirtschaftlichen Schäden. In den Ostalpen sind zum Beispiel die Ereignisse im August 2002 (BMLFUW 2004) und August 2005 (Habersack und Krapesch 2006) sowie das Ereignis im Juni 2013 (Blöschl *et al.* 2013) zu nennen. Während die Hochwasserschäden über die Zeit stark gestiegen sind (Munich RE 2017), hat sich die Anzahl und Magnitude von Hochwasserereignissen nicht eindeutig in gleicher Weise entwickelt (Blöschl *et al.* 2019). Entsprechend werden gestiegene Hochwasserschäden oftmals auf eine Bevölkerungszunahme, wachsenden Wohlstand und insbesondere eine Wertezunahme in hochwassergefährdeten Gebieten zurückgeführt (Elmer *et al.* 2012; Cammerer und Thieken 2013; Löschner *et al.* 2016).

Gemäß der 2007 verabschiedeten EU-Hochwasserrichtlinie (EU 2007) soll einer möglichen Veränderung des Hochwasserrisikos durch die regelmäßige Überprüfung und Aktualisierung von Hochwasserrisikoanalysen und -managementplänen Rechnung getragen werden. Darüber hinaus fordert sie explizit, "die wahrscheinlichen Auswirkungen des Klimawandels auf das Auftreten von Überschwemmungen zu berücksichtigen" (EU 2007). In diesem Kontext ist es entscheidend, zu verstehen, welche Faktoren das Hochwasserrisiko verändern und wie diese interagieren. Die ganzheitliche Betrachtung hydrologischer Fragestellungen in einem breiteren gesellschaftlichen Kontext ist ein aktueller interdisziplinärer Forschungsschwerpunkt der als "sociohydrology" bezeichnet wird (Sivapalan et al. 2012; Elshafei et al. 2014; Di Baldassarre et al. 2019). Hinsichtlich des zukünftigen Hochwasserrisikos muss entsprechend eine integrale Modellierung und Analyse verschiedener physischer wie auch gesellschaftlicher Treiber und deren Interaktion berücksichtigt werden (Di Baldassarre et al. 2015). Durch die Einbindung relevanter gesellschaftlicher und behördlicher Akteure können relevante Prozesse identifiziert und abgeschätzt werden (Melsen et al. 2018).

Grundsätzlich unterliegt das Hochwasserrisiko Veränderungen in drei übergeordneten Systemen: (i) Veränderungen im Klimasystem, (ii) Veränderungen im terrestrischen und hydrologischen System und (iii) Veränderungen im sozioökonomischen System (Blöschl et al. 2015). Während Veränderungen des Klima- und hydrologischen System die Abfluss- und Hochwassergenese kontrollieren, bestimmen sozioökonomische Faktoren, wie Bevölkerungswachstum, Siedlungsausbreitung oder auch Raumplanungsmaßnahmen, maßgeblich das Risikopotenzial (z.B. Anzahl und Wert der exponierten Gebäude). Die Bestimmung des Hochwasserrisikos ist eine komplexe Aufgabe, da neben der Quantifizierung von potenziellen negativen Folgen insbesondere die Eintrittswahrscheinlichkeit berücksichtigt werden muss (EU 2007). Dabei wird in der Praxis normalerweise das Hochwasserrisiko unter Berücksichtigung der aktuellen Systembedingungen und unter Annahme einer sich nicht verändernden Umwelt (Stationarität) beschrieben (Vorogushyn et al. 2018).



Weiterhin konzentrieren sich Studien über mögliche Veränderungen des Hochwasserrisikos meist auf die Analyse einzelner Teilaspekte wie zum Beispiel Landnutzungsänderungen (Cammerer und Thieken 2013; Cammerer et al. 2013; Rogger et al. 2017) oder den Einfluss des Klimawandels (Hundecha und Merz 2012; Blöschl et al. 2018). Die Analyse von Veränderungen des Hochwasserrisikos aus einer integralen Perspektive der verschiedenen relevanten Aspekte stellt eine aktuelle Forschungslücke dar.

Das Forschungsprojekt HiFlow-CMA setzt genau an dieser Forschungslücke an und versucht durch einen interdisziplinären Herangehensweise die verschiedenen relevanten Teilaspekte zu einem Gesamtbild zusammenzufügen. Das übergeordnete Ziel des Projektes ist die Analyse der möglichen Entwicklung des Hochwasserrisikos bei integraler Berücksichtigung von Veränderungen in Klima, Hydrologie und Sozioökonomie. Die Ausprägung der sozioökonomischen Entwicklung wird in Form der regionalen Landnutzung und Siedlungsentwicklung abgebildet. Diese spiegelt zum einen die Veränderung des Schadenspotenzials durch Ausbreitung und Veränderung des Siedlungsraums und zum anderen die Veränderungen des hydrologischen Systems auf Einzugsgebietsebene wider (z.B. Versiegelung oder Änderung von Verdunstungsraten durch Landnutzungsänderungen). Als Untersuchungsgebiet wurde das österreichische Bundesland Vorarlberg ausgewählt. In Vorarlberg wurden in den vergangenen Jahren mehrere Studien zum Themenkomplex Hochwasserrisikomanagement durchgeführt auf denen aufgebaut wird (Huttenlau et al. 2015; Schneeberger et al. 2015a; Schneeberger und Steinberger 2018; Schneeberger et al. 2019).

Die Leitfragen des Projekts HiFlow-CMA lauten:

- Wie können zukünftige Klimawandel- und Landnutzungsszenarien im Untersuchungsgebiet aussehen?
- Welche Auswirkungen haben Klima-, Landnutzungs- und Siedlungsentwicklung auf das Hochwasserrisiko im Untersuchungsgebiet?
- Welchen Beitrag können Objektschutz- sowie raumplanerische Maßnahmen zur Reduktion des Hochwasserrisikos leisten?

Um alle relevanten Themen des Projekts abdecken zu können, wurde die Expertise aus verschiedenen Wissenschaftsbereichen (Hydrologie, Meteorologie, Landnutzungsdynamik, Naturgefahren und Risikoforschung) in einem interdisziplinären Konsortium zusammengefasst. Ein Team bestehend aus ForscherInnen der Universität Innsbruck (Institut für Geographie, Arbeitsgruppe alpS Research und Institut für Infrastruktur, Arbeitsbereich Wasserbau) und der Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) wurde in der Konzeption und wissenschaftlichen Diskussion durch einen weiteren Partner an der Leibniz Universität Hannover unterstützt. Zudem war die transdisziplinäre Zusammenarbeit mit lokalen Stakeholdern von großer Bedeutung. Dies betrifft insbesondere die Datenerhebung, die Entwicklung möglicher zukünftiger Landnutzungsszenarien sowie die Kommunikation und Diskussion der komplexen Forschungsergebnisse.



## 4 Projektinhalt und Ergebnisse

Im wissenschaftlich-technischen Kontext wird Hochwasserrisiko oft als Produkt aus der Wahrscheinlichkeit eines Hochwasserereignisses (Gefährdung) und der hochwasserbedingten negativen Folgen (Exposition und Anfälligkeit) definiert (z.B. Kaplan und Garrick 1981; EU 2007; Merz et al. 2010; Klijn et al. 2015). Um zeitliche und räumliche Veränderungen des Hochwasserrisikos zu analysieren, muss das System möglichst integral betrachtet werden. Für das Projekt HiFlow-CMA wurde hierfür ein innovativer gekoppelter Modellierungsansatz entwickelt, der zukünftige Landnutzungs- und Klimaänderungen berücksichtigt.

Um die mögliche zeitliche Veränderung des Hochwasserrisikos abzuschätzen, wurden drei Zeiträume von jeweils 30 Jahren ausgewertet. Als Referenzzeitraum wurde 1987 bis 2016 (ref) verwendet und als zukünftige Modellierungszeiträume die "Nahe Zukunft" (2021-2050) und die "Ferne Zukunft" (2071-2100) (vgl. Abbildung 1). Die Entwicklung der Gefährdung wurde durch die hydrologische Modellierung des Abflussverhaltens des jeweiligen Zeitraums abgebildet und mit Überschwemmungsflächen kombiniert. Dabei wurden einerseits mögliche Klimaszenarien (ÖKS15) und andererseits mögliche Landnutzungsänderungen in den Einzugsgebieten berücksichtigt. Da es jedoch nicht ausreicht die wenigen Hochwasserereignisse innerhalb der relativ kurzen Modellierungszeiträume (je 30 Jahre) auszuwerten um belastbare statistische Aussagen zu treffen, wurden für die Risikobeurteilung auf Basis der modellierten Abflussdaten lange Zeitreihen an synthetischen Hochwasserereignissen generiert (1000 Jahre).

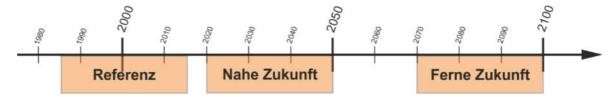


Abbildung 1 Modellierungszeiträume.

Durch eine räumlich explizite Landnutzungsmodellierung konnte das sich räumlich und zeitlich verändernde Schadenspotenzial abgebildet werden. Hierfür wurden zunächst verschiedene soziökonomische Szenarien für das Untersuchungsgebiet definiert. Die Modellierungsergebnisse der Landnutzung stellen ebenso die Datengrundlage für eine mögliche Veränderung der Vegetation in Flusseinzugsgebieten dar. Als dritte Komponente wurden zusätzlich mögliche Anpassungsmaßnahmen zur Reduktion des Hochwasserrisikos in Form von Raumplanungsmaßnahmen sowie Objektschutzmaßnahmen integriert. In Abbildung 2 ist eine Übersicht der gesamten Modellkette und das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten dargestellt.



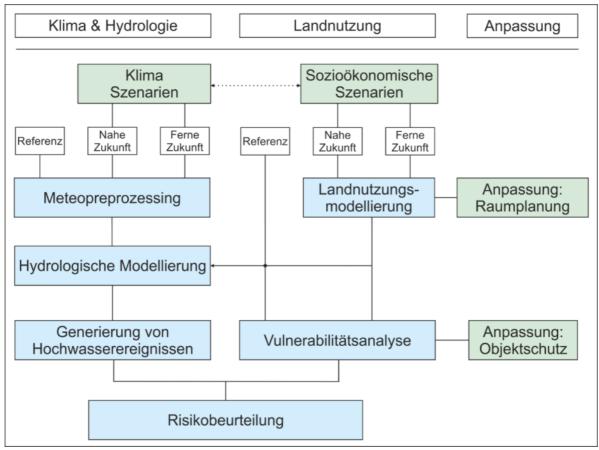


Abbildung 2 Schematische Darstellung des gekoppelten Modellierungsansatzes.

## 4.1 Untersuchungsgebiet

Als Untersuchungsgebiet dient das österreichische Bundesland Vorarlberg mit einer Gesamtfläche von ca. 2.600 km² und 390.000 Einwohnern (Statistik Austria 2019b). Vorarlberg spiegelt einen typischen Alpenraum mit einem komplexen topographischen Terrain, von dicht besiedelten Talböden bis zu hochalpinen Umgebungen, wider (Sauter *et al.* 2019). In den letzten Jahrzehnten kam es mehrfach zu schweren Hochwasserereignissen in Vorarlberg (1999, 2002, 2005, 2013). Der direkte materielle Schaden im öffentlichen und privaten Sektor, einschließlich Infrastruktur wird für das Hochwasserereignis im August 2005 auf rund 180 Millionen Euro geschätzt (Habersack und Krapesch, 2006).

Das Untersuchungsgebiet Vorarlberg wurde aufgrund umfangreicher Vorkenntnisse und Arbeiten aus früheren Projekten ausgewählt. Die Entwicklung und Anwendung der Methodik im Untersuchungsgebiet ist auch auf andere Regionen in Österreich übertragbar.



#### 4.2 Aufbereitung der Klimaszenarien (WP2)

Der meteorologische Antrieb für die hydrologischen Modellierung basiert auf den ÖKS15 – Klimaszenarien für Österreich (Chimani *et al.* 2016). Insgesamt wurden im Rahmen von ÖKS15 mögliche Kombinationen bestehend aus einem globalen Klimamodell (sog. GCM, *general circulation model*) und regionalen Klimamodell (sog. RCM, *regional climate model*) erstellt. Davon wurden für das Projekt HiFlow-CMA vier geeignete Kombinationen gewählt wobei eine größere Anzahl wegen des hohen Prozessierungsaufwands nicht möglich war. Bei der Auswahl wurde darauf geachtet, unterschiedliche Kombinationen aus Regional- und Globalmodellen zu berücksichtigen. Zudem wurden nur Modellkombinationen aufgenommen, welche nicht durch sehr große Unsicherheiten für die typischen Wetterlagen (>40 % überbzw. unterschätzt) in den hochwasserrelevanten Sommermonaten gekennzeichnet sind (Chimani *et al.* 2018). Die Auswahl umfasst die Modellketten *MPI\_CLM*, *EC-EARTH\_RCA*, *EC-EARTH\_RACMO* und *CNRM\_CLM*. Für den Referenzzeitraum wurden die "Hindcast"-Simulation herangezogen.

Die ÖKS15 Daten basieren auf den EURO-CORDEX Datensätzen, haben eine gegitterte räumliche Auflösung von 1 km und liegen in tägliche Auflösung vor (Chimani et al. 2016). Da das Untersuchungsgebiet Vorarlberg durch eine alpine Topographie und relativ kleinen (Teil-)Einzugsgebiete mit entsprechend schnellen Abflussprozessen gekennzeichnet ist, gibt es eine große Diskrepanz zwischen mittlere Tagesabflüssen und auftretenden Maximalabflüssen (Taguas et al. 2008; Dastorani et al. 2013; Schneeberger und Steinberger 2018). Um die eigentlich kritischen Spitzenabflüssen nicht zu unterschätzen, wurden die meteorologischen Antriebsdaten auf stündliche Werte disaggregiert. Details über die Disaggregierungsmethode sowie eine Evaluation der Zwischenergebnisse sind im erweiterten Methodenkapitel "Disaggregierung" (Kapitel 6.1) aufgeführt. Die entwickelte Methode wurde im Rahmen des Projektes auf Basis einer Punktdatenanwendung in Winter et al. (2019) veröffentlicht.

# 4.3 Landnutzungsmodellierung (WP3)

Die Landnutzung und ihre Entwicklung, wird neben natürlichen Faktoren (z.B. Klima, Topographie) insbesondere durch menschliche Aktivitäten bestimmt. Topographisch und wirtschaftlich attraktive Standorte sind dabei einem enormen Entwicklungsdruck ausgesetzt und werden dies auch in Zukunft sein. Mit Hilfe von auf Szenarien basierter Landnutzungsmodellierung können plausible zukünftige Entwicklungspfade der Landnutzung identifiziert werden (Price et al. 2015; Pazúr und Bolliger 2017). Szenarien stellen dabei mögliche Entwicklungspfade unter Annahme von bestimmten Gegebenheiten dar. Dies sind zum Beispiel Bevölkerungsund Siedlungsentwicklung, wirtschaftliche Entwicklung oder auch die Ausbreitung von Wäldern. Während die Szenarien den generellen Entwicklungsrahmen vorgeben, wird bei der eigentlichen Landnutzungsmodellierung regelbasiert deren explizite räumliche Ausprägung modelliert.



#### Landnutzungsszenarien

Um plausible Entwicklungen in der Landnutzung zu veranschaulichen, wurden vier Szenarien für zukünftige Veränderungen der Landnutzung definiert (sozioökonomischen Szenarien). Diese basieren auf der Analyse der Landnutzungsänderungen zwischen 2001 und 2016 (Trends) sowie vier verschiedene Handlungsstränge, die im Rahmen der Österreichischen Raumordnungskonferenz ÖROK beschrieben werden (ÖROK 2009, 2011). Um die angestrebten Zeiträume (2021 – 2050, 2071 – 2100) zu erreichen, wurden die Szenarien unter Berücksichtigung von Bevölkerungsprognosen und Trends (ÖROK 2010), sowie Prognosen der landwirtschaftlichen Entwicklung in Europa (Verburg *et al.* 2013) extrapoliert (vgl. Abbildung 3).

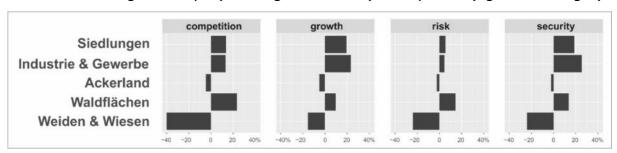


Abbildung 3 Übersicht des Landänderungsbedarfs der vier definierten Szenarien.

#### Modellierungsansatz

Die zukünftigen Landveränderungen wurden in einem zweistufigen Prozess modelliert. In einem ersten Schritt werden sogenannte Wahrscheinlichkeitsoberflächen (probability surfaces) für die einzelnen Landnutzungsklassen berechnet und in einem zweiten Schritt über ein iteratives Verfahren die eigentliche räumliche Ausprägung modelliert.

Für bebaute Gebiete und die damit verbundene Entwicklung neuer Siedlungsstrukturen wurde ein neuer Modellierungsansatz entwickelt. Dieser berücksichtigt die lokal vorherrschende Bebauungsstruktur. Somit können die räumlichen Strukturen von locker bebauten Wohnvierteln oder dicht bebaute Innenstadtgebieten realistischer nachgebildet werden. Die komplexe Modellstruktur und eine detaillierte Beschreibung des methodischen Vorgehens ist im Methodenkapitel "Landnutzungsmodell" (Kapitel 6.2) dargestellt.

Raumplanerische Vorgaben sind ein zentrales Werkzeug von nicht-strukturellen Anpassungsmaßnahmen im Bereich des Hochwasserrisikomanagement (Kundzewicz 2002). Für eine bestmögliche Berücksichtigung, wurden verschiedene Raumplanungsmaßnahmen direkt in die Landnutzungsmodellierung integriert. Die Maßnahmen beschränken sich dabei auf die Ausweisung von Entwicklungsverbotszonen, in welchen keine neuen Siedlungsstrukturen entstehen können. Die Ausweisung von entsprechenden Flächen basiert dabei grundsätzlich auf schon bestehenden gesetzlichen Definitionen sowie weiteren Annahmen die auch im Zuge der Stakeholder Workshops diskutiert und angepasst wurden. Dabei wurde ein "baseline" Szenario (aktuelle Situation), ein "adaptation" Szenario (zusätzliche Ausweisung der gelben Gefahrenzone) sowie ein "extrem" Szenario (keine Einschränkungen)



definiert. Details sowie eine kartographische Darstellung inklusive Übersichtstabelle finden sich in Kapitel 6.7.

#### Modellierungsergebnisse Landnutzung

Die Ergebnisse der Landnutzungsmodellierung zeigen, dass insbesondere die attraktiven und einfacher zu erschließenden topographisch flachen Gebiete des Rheintals sowie des Walgaus durch eine weitere Siedlungsausbreitung gekennzeichnet sind. Weiterhin ist eine deutliche Ausbreitung der Waldgebiete zu identifizieren. Die Waldausbreitung erfolgt hauptsächlich auf Kosten bestehender extensiv genutzter Wiesen und Almflächen. Die verschiedenen sozioökonomischen Szenarien ("competition", "growth", "risk", "security") unterscheiden sich dabei teilweise erheblich in ihrer räumlichen Ausprägung. Die grundsätzlichen Entwicklungen von Siedlungsausbreitung in den Tallagen sowie Ausbreitung der Waldgebiete (vgl. Abbildung 4(c)) können in allen Landnutzungspfaden beobachtet werden.

Der innovative Modellierungsansatz mit einer sehr hohen
räumlichen Auflösung und unter Berücksichtigung von
kleinskaligen Siedlungsstrukturen ermöglicht eine plausible
Fortschreibung von bestehenden Strukturen. In Abbildung
4(a) und (b) ist die Ausbreitung
und Nachverdichtung der Siedlungsstrukturen über die Zeit
gut sichtbar und stellt eine ideale Grundlage für eine realistische Risikoanalyse dar.

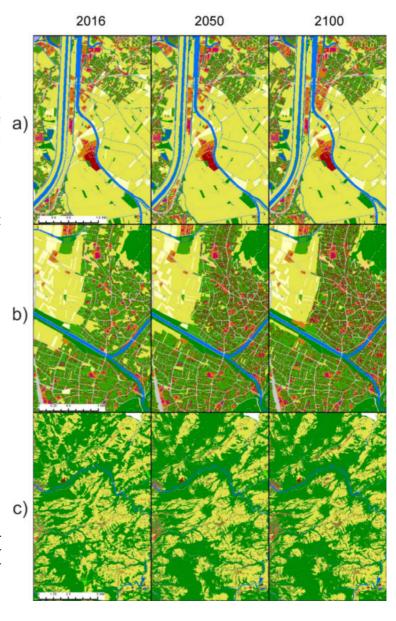


Abbildung 4 Darstellung zukünftiger Landveränderungen auf Basis der Modellierungsergebnisse für 3 ausgewählte Ausschnitte(a, b, c) und den Zeiträumen 2016, 2050 und 2100.



#### 4.4 Hydrologische Modellierung (WP4)

Die aufbereiteten meteorologischen Antriebsdaten (WP2) (Referenz- und Szenarienzeitraum) wurden mit Hilfe des hydrologische Modells HQsim für das gesamte Untersuchungsgebiet kontinuierlich simuliert. HQsim zählt zu den halbverteilten, konzeptionellen Niederschlag-Abfluss-Modellen (NA-Modell) und wurde erfolgreich in verschiedenen, insbesondere alpinen Untersuchungsgebieten, eingesetzt (Kleindienst 1996; Senfter et al. 2009; Achleitner et al. 2012; Dobler und Pappenberger 2013; Winter et al. 2019). Die Prozessmodellierung des halbverteilten Modells basiert auf sogenannten Hydrologischen Response Units (HRUs). HRUs sind räumlich zusammengefasste Modellteilflächen mit möglichst identischer Charakterisierung in Bezug auf hydrologische Prozesse wie zum Beispiel Bodenklasse, Landbedeckung/Vegetation, Hangausrichtung oder topographische Höhe.

#### Modellerweiterungen

Speziell für die Anforderungen des Projektes wurde das Modell in zwei Aspekten weiterentwickelt. Zum einen wurde ein neuer Ansatz für die Berechnung der Verdunstung integriert und zum anderen ein Konzept zur Berücksichtigung sich über die Zeit verändernden Landbedeckung entwickelt.

In der Grundkonfiguration wird die Verdunstungsberechnung nach dem Konzept von Hamons potentieller Evaporation in Abhängigkeit des verfügbaren Wassers berechnet (Federer und Lash 1978). Um den Einfluss von Landnutzungsänderungen besser Rechnung zu tragen und den Strahlungsdatensatz der ÖKS15 Daten zu nutzen wurde ein neuer Berechnungsansatz auf Basis der weit verbreiteten Penman-Monteith Gleichung ergänzt (Monteith 1965). Aufgrund der verfügbaren Datenlage für die ÖKS15 Szenarien (keine Information zu Windgeschwindigkeit und Luftfeuchtigkeit) wurden dabei zwei Vereinfachungen angewandt. Zum einen wird von einer konstanten durchschnittlichen Windgeschwindigkeit von 2 m/s ausgegangen und zum anderen von einer relativen Luftfeuchtigkeit von 0.9 bei Niederschlag und 0.7 bei trockenen Verhältnissen ausgegangen. Um eine größtmögliche Kompatibilität für zukünftige Anforderungen zu erreichen sind diese Annahmen nur ein optionaler Bestandteil und können bei Verfügbarkeit auch durch Messdaten ersetzt werden.

Um Landnutzungsänderung in der hydrologischen Modellierung berücksichtigen zu können, wurde das Berechnungskonzept für das NA-Modell HQsim weiterentwickelt. In dem neuen Ansatz werden alle Prozesse der Abflussbildung (z.B. Interzeption, Verdunstung) für jedes HRU und jede Landnutzungsklasse separat berechnet und im Anschluss anhand der relativen Anteile der Landnutzungsklassen zusammengesetzt. Diese Erweiterung ermöglicht, dass sich die Anteile der Landnutzungsklassen für jedes HRU dynamisch entsprechend der Ergebnisse der Landnutzungsmodellierung über die Zeit verändern können.



#### Modellaufbau und Kalibrierung

Um das gesamte Untersuchungsgebiet abzudecken, wurden auf Basis verfügbarer und abgeleiteter Geodaten (vgl. Tabelle 1) sieben hydrologische Teilmodelle aufgebaut. Die jeweiligen Einzugsgebiete, sowie verwendete Pegelmessstellen und deren Sub-Einzugsgebiete sind in Abbildung 5 dargestellt.

Tabelle 1 Grundlagendaten für den Aufbau der hydrologischen Modelle.

Name	Beschreibung / Anwendung	Quelle	
Landnutzung / -bede- ckung	Landnutzungsklassen zur Beschreibung von Landnutzungsparametern und der Ableitung von hydraulischen Rauhigkeitsklassen	Eigene Kompilation im Rahmen der Landnutzungsmodel- lierung	
Bodenkarte	Bodenklassenkarte zur Bestimmung von Bodenparametern	Hydrologischer Atlas Österreich	
Geländemodell (DGM)	Digitales Geländemodell zur Ableitung des Gewässernetzes, Einzugsgebiete, Geländehöhe, Hangneigung, Hangaus- richtung	EU-DEM	

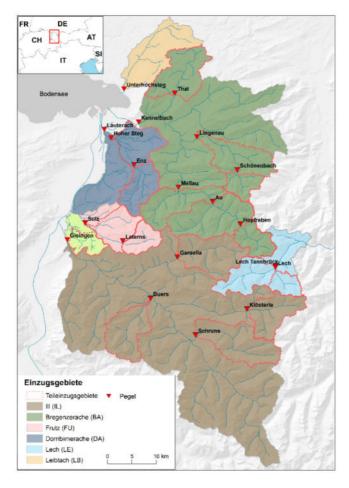


Abbildung 5 Übersicht des Untersuchungsgebiets und der hydrologischen Teilmodell.



Die Teilmodelle wurden durch ein klassisches "split-sampling" anhand von stündlichen Beobachtungsdaten (INCA, Haiden et al. 2011) kalibriert und validiert. Für die Kalibrierung wurde ein globales Parameteroptimierungsverfahren mittels Differential Evolution Algorithmus umgesetzt (Storn und Price 1997). In Abbildung 6 ist ein Beispielergebnis für die Beobachtungs- und Simulationszeitreihe des kalibrierten Modells für den Pegel Lauterach (Dornbirnerache) dargestellt. Eine detaillierte Beschreibung der Kalibrierroutine sowie eine Tabelle mit den Ergebnissen aller Teileinzugsgebiete sind im vertiefenden Methodenkapitel unter "Kalibrierung und Validierung des hydrologischen Modells" (Kapitel 6.3) zu finden.

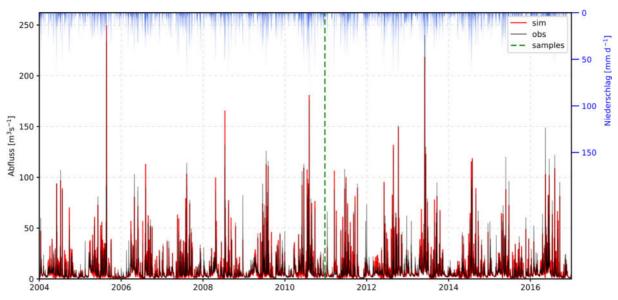


Abbildung 6 Vergleich von Beobachtung und Simulation des Abflusses am Beispiel der Dornbirnerache am Pegel Lauterach.

## Modellierung von Szenarien

Nach Kalibrierung und Validierung der Niederschlag-Abfluss Modelle erfolgte die Generierung von Abflusszeitreihen für die Simulation der Szenarien. Die Szenarien beinhalten die zeitliche Dimension ("Nahe Zukunft" und "Ferne Zukunft"), die Klimamodellkombinationen ("ec-earth\_rca", "ec-earth\_racmo", "mpi\_clm", "cnrm\_clm") sowie die unterschiedlichen Landnutzungsentwicklungspfade ("risk", "security", "competition" und "growth"). Das Ergebnis der Simulation sind kontinuierliche Abflussganglinien in stündlicher Auflösung für einen Simulationszeitraum von jeweils 30 Jahren. Die berechneten Abflussganglinien dienen im nächsten Schritt als Datenbasis für die Hochwasserrisikomodellierung.

Durch Bestimmung der Extremwertverteilung kann der zu bestimmten Jährlichkeiten korrespondierende Abfluss bestimmt werden (z.B. 100-Jährlicher Abfluss). In Abbildung 7 wurde exemplarisch an zwei Pegelmessstellen die Extremwertverteilung (Gumbel) der Szenarienläufe (Ensemble Mittelwert) im Vergleich zu dem Referenzzeitraum berechnet. Der bestimmte Extremabfluss für die "Nahe-" bzw. "Ferne Zukunft" kann je nach Szenario sowohl oberhalb als auch unterhalb des Referenzlaufes liegen. Dabei kann dies zusätzlich lokal unterschiedlich ausfallen. Im Vergleich zwischen den Zeitscheiben der "Nahen-" und "Fernen Zukunft"



konnte keine systematisch höheren Abflusswerte für die "Ferne Zukunft" festgestellt werden. Auch die Streuung der Szenarienbandbreite (roter Bereich) ist zum Teil in der "Nahen Zukunft" im Vergleich zur "Fernen Zukunft" höher (vgl. Abbildung 7). Generell sind hohe Abweichungen zwischen einzelnen Klimaszenarien und kein kohärentes Bild festzustellen.

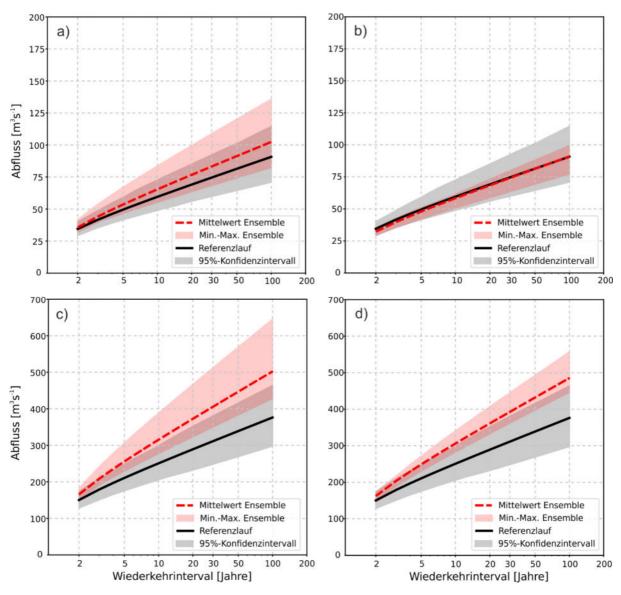


Abbildung 7 Beispiele der Extremwertverteilung (Gumbel) an zwei Pegelmessstellen (Garsella (a,b) und Mellau (c,d)) für die hydrologischen Modellierungen der Szenarien (Ensemble Mittelwert der vier Klimamodellkombination für RCP8.5 und die Landnutzungsentwicklung "competition") und des Referenzlaufs (schwarz). Die linke Spalte zeigt die Ergebnisse für das Szenario "Nahe Zukunft" und die rechte Spalte die Ergebnisse für das Szenario "Ferne Zukunft".

Eine Auswertung des Einflusses der sich ändernden Landnutzung ergab nur geringfügige Veränderungen in Bezug auf die relevanten Spitzenabflüsse. Hierfür wurde ein Szenarienlauf für die "Ferne Zukunft" (*EC-EARTH\_RACMO*), zum einen unter Berücksichtigung der Landnutzungsänderung und zum anderen mit angenommener statischer Landnutzung (Initaljahr 2016), simuliert. Die Vergleichssimulation resultiert durchschnittlich in einer leichten Abnahme des Spitzenabflusses (HQ100), je nach Szenario, zwischen 1.6-2.4%. Der vorherrschende Prozess ist



dabei auf die erhöhten Waldanteile zurückzuführen, welche wiederum durch eine höhere Verdunstungsrate und eine höhere Interzeptionskapazität gekennzeichnet sind (Schattan *et al.* 2013; Speich *et al.* 2020). Dabei kann insbesondere die Vorbedingung von Ereignissen beeinflusst werden. Gegenläufig wirkt die Zunahme der Siedlungsstrukturen die durch Versiegelung zu höheren Direktabflüssen führt (Jacobson 2011). Bezogen auf die Gesamtfläche der Einzugsgebiete fällt der Siedlungszuwachs jedoch meist nur gering aus. Dabei ergaben die Szenarien Berechnungen je nach Gebietsgröße und Charakteristik durchaus auch eine leichte Zunahme des Spitzenabflusses von bis zu +0.8%. Die größte Abnahme durch eine starke Zunahme der Bewaldung mit -7.2% berechnet. Die im Durschnitt nur geringe Veränderung kann insbesondere durch die zwei entgegengesetzt wirkenden Prozesse erklärt werden.

Die Veränderungen in der Landnutzung und Siedlungsentwicklung ist dabei stark von der Größe der Einzugsgebiete abhängt. Insbesondere kleine Einzugsgebiete können relativ große relative Veränderungen aufzeigen. Entsprechend haben bei kleinräumigen lokalen Betrachtungen weitreichende Veränderung in der Kulturlandschaft durchaus einen großen Einfluss auf das Abflussgeschehen (Viglione *et al.* 2016). Dies ist insbesondere relevant, wenn neben fluvialen Hochwassern, auch andere Prozesse, wie zum Beispiel Sturzfluten durch Starkregenereignissen berücksichtigt werden oder der Fokus auf Veränderungen in der Gesamtwasserbilanz liegt (Köplin *et al.* 2013; Strasser *et al.* 2019; Speich *et al.* 2020).

#### 4.5 Risikomodellierung (WP5+6)

In der herkömmlichen Praxis wird das Hochwasserrisiko für ein Untersuchungsgebiete vielfach auf der Annahme eines homogenen Hochwasserereignisses mit einer einheitlichen Eintrittswahrscheinlichkeit (z.B. 100-Jährliches Hochwasser) abgeleitet (Vorogushyn *et al.* 2018). Reale Hochwasserereignisse sind jedoch aufgrund der meteorologischen Ausprägung, unterschiedlicher Gebietscharakteristik oder dem Zusammenspiel mehrerer Teileinzugsgebiete räumlich und zeitlich heterogen. Entsprechend führt die Annahme eines homogenen Hochwasserszenarios zu einer Fehleinschätzung des Hochwasserrisikos (Thieken *et al.* 2015; Falter *et al.* 2016; Winter *et al.* 2020). Die Anzahl realer Hochwasserereignisse und damit einhergehenden Schadensaufzeichnungen sind zudem in der Regel nicht ausreichend um eine robuste statistische Aussage über das Hochwasserrisiko zu tätigen. Um diese Limitation zu überwinden kann eine Zeitreihe an räumlich realistischen, heterogenen Hochwasserereignissen erzeugt und anschließend bewertet werden.

Im Rahmen des Projektes HiFlow-CMA wurde für die Risikobewertung das Probabilistische Hochwasser Risiko Analysis Modell (PRAMo) eingesetzt (Schneeberger et al. 2019). In PRAMo wird die gesamte Risikokette von der Gefährdung über die Vulnerabilität und Risikobewertung abgebildet. Das Risikomodell ist in drei Modulen aufgebaut, die im Folgenden kurz beschrieben werden und in Abbildung 8 visualisiert sind. Eine detaillierte Modellbeschreibung findet sich in Schneeberger et al. (2015b) sowie Schneeberger et al. (2019).



**Hazard Modul:** Generierung von beliebig langen Zeitreihen an räumlich heterogenen Hochwasserszenarien für das gesamte Gewässernetz auf Basis von Abflusszeitreihen. Für die Simulation wird das multivariate, statistische Modell nach Heffernan und Tawn (2004) eingesetzt.

**Impact Modul:** Klassifizierung und Bewertung der Risikoelemente, Expositions- und Vulnerabilitätsanalyse mittels Schadensfunktionen. Ableitung der Schadens-Wahrscheinlichkeits-Beziehung für alle administrativen Einheiten im Untersuchungsgebiet (hier Gemeinden).

**Risk Assessment Modul:** Bewertung der Szenarienzeitreihen durch Kombination der Ergebnisse des "Hazard" und "Impact" Moduls. Statistische Auswertung der Schadenszeitreihe und Ableitung des jährlichen Erwartungsschadens bzw. der Risikokurve.

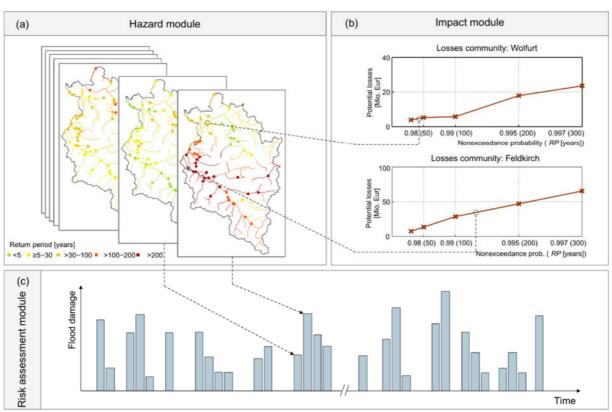


Abbildung 8 Funktionsweise und modularer Aufbau des Risikomodells PRAMo (Schneeberger et al. 2019).

Im Gegensatz zu ursprünglichen Anwendungen kommen im Rahmen des Projektes HiFlow-CMA nicht Pegelbeobachtungen (vgl. Schneeberger et al. 2019), sondern die Ergebnisse der NA-Modellierung zum Einsatz, um lange heterogene Zeitreihen auf Basis der o.g. Landnutzungs- bzw. Klimaszenarien zu generieren. Dadurch kann die sich verändernde Gefährdungslage abgebildet werden. Um das sich verändernde Risikopotenzial einzubeziehen, wurde auch das Impact Modul (vgl. Abbildung 8) weiterentwickelt. Hierfür wurde zum einen für jedes Landnutzungsszenario eine unabhängige Schadens-Wahrscheinlichkeits-Beziehung berechnet und zum anderen die zeitliche Entwicklung in 10 Jahres Schritten berücksichtigt. Die Schadensauswertung basiert dabei nicht auf Objektdaten, sondern direkt auf den



Ergebnissen der Landnutzungsmodellierung (Rasterdaten). Details über die Werteübertragung von Objekt auf Rasterdaten finden sich im Methodenkapitel (Kapitel 6.4). Für die abschließende Risikobewertung wird jedem generierten Hochwasserszenario die zeitlich entsprechende Schadens-Wahrscheinlichkeits-Beziehung zugeordnet.

Die Berücksichtigung von Objektschutzmaßnahmen wurde nach Achleitner et al. (2016) umgesetzt. Um den schadensmindernden Effekt der Maßnahmen abzubilden, werden für die Vulnerabilitätsanalyse modifizierte Schadensfunktionen genutzt. Dabei wurde zwischen mobilen Schutzmaßnahmen (z.B. temporäre Abdichtungen), bei welchen sich bei Überströmen des Schutzziels der volle Schaden einsetzt, und grundsätzlichen verändertem Strukturdesign der Gebäude (z.B. erhöhte Bauweise) unterschieden. Bei angepasstem Strukturdesign wird von einer graduellen Fortentwicklung des Schadens bei Überströmen des Schutzziels ausgegangen (Achleitner et al. 2016). Eine detaillierte Beschreibung der implementierten Objektschutzmaßnahmen ist in Kapitel 6.6 gegeben.

Bevor eine Bewertung der unterschiedlichen Zukunftsszenarien vorgenommen werden kann, muss ein Referenzsenzario definiert werden. Dieses basiert auf den Hindcastdaten der Klimamodellläufe und der Landnutzung zum Initialzeitpunkt 2016. Das methodische Vorgehen entspricht der Ableitung der Simulationsläufe, die alle Aspekte von der zeitlichen Komponente ("Nahe" und "Ferne" Zukunft) bis zu den Objektschutzmaßnahmen beinhalten, und inkludiert somit die Disaggregierunsprozedur, die NA-Modellierung sowie die Szenariengenerierung und Auswertung mittels des Risikomodells (s.a. Abbildung 2).

In Abbildung 9 ist das Ergebnis des Referenzlaufs in Form einer Risikokurve dargestellt. Der Unsicherheitsbereich (graue Schattierung) basiert auf der Berechnung von 100 Realisationen des Risikomodells, wobei jeweils eine synthetische Zeitreihe von 1000 Jahren simuliert wird. Der ermittelte maximale Schaden eines 100-Jährlichen Schadensereignisses beläuft sich somit auf ca. 180 Mio. EUR. Dieser Wert

ist mit früheren Studien, die auf direkten Pegelbeobachtungen basieren, vergleichbar (z.B. Schneeberger et al. 2019). Zwar ist der absolute Wert deutlich höher, jedoch wurden bei früheren Studien ausschließlich Wohngebäude berücksichtigt.

Abbildung 9 Simulationsergebnis des Risikomodells für den Referenzlauf.



#### 4.6 Ergebnisse der Szenarienberechnung

Abschließend wurde die gesamte Risikokette und alle Szenarienvariationen ausgewertet. Um eine einfachere Interpretation zu ermöglichen, wurden die Ergebnisse getrennt nach unterschiedlichen Szenariendimensionen ausgewertet. Dies beinhaltet, (a) die unterschiedlichen Klimamodellkombinationen, (b) die Modellierungszeiträume der "Nahen-" und "Fernen Zukunft", (c) einen mittleren (RCP4.5) und hohen Repräsentativen Konzentrations-Pfad (RCP8.5), (d) die vier unterschiedlichen sozioökonomischen Szenarien und die Anpassungsmaßnahmen (e) Raumplanung sowie (f) Objektschutz. Die ausgewerteten Szenariendimensionen sind in Tabelle 2 übersichtlich zusammengefasst. Neben der jeweils untersuchten Dimension wurden alle anderen Aspekte als einheitliche Vergleichsbasis in einer Grundkonfiguration festgehalten. Als Vergleichsgrundlage dient das Emissionsszenario RCP8.5, das Raumplanungsszenario "baseline", kein Objektschutz sowie das Sozioökonomische Entwicklungsszenario "competition".

Die in Tabelle 2 genannten sechs Szenariendimensionen beeinflussen das zukünftige Hochwasserrisiko und sind unterschiedlich stark von Unsicherheiten geprägt. Einige Ergebnisse gelten dabei als robust und andere als sehr unsicher. Die Resultate werden entsprechend der Übereinstimmung einzelner Szenarienläufe und ihrer Plausibilität eingeordnet. Somit ergeben sich Modellierungsergebnisse denen eine *geringe*, *mittlere* oder *hohe Glaubwürdigkeit* zugeordnet wird. Dabei handelt es sich um eine qualitative Einordnung, die als Orientierungshilfe dienen soll.

Tabelle 2 Übersicht der ausgewerteten Szenariendimensionen.

	Szenariendimension	Kurzbeschreibung
(a)	Klimamodelle	Kombination aus Global- und Regionalmodellen ("ec-earth_rca", "ec-earth_racmo", "mpi_clm", "cnrm_clm")
(b)	Simulationszeitraum	Modellierungszeiträume, "Referenz", "Nahe Zukunft" und "Ferne Zukunft"
(c)	Repräsentative Kon- zentrations-Pfade	Emissionsszenarien der Klimamodelle (RCP4.5 und RCP8.5)
(d)	Sozioökonomische Entwicklung	Landnutzungsveränderung auf Basis der angenommen sozioökonomischen Entwicklungspfade ("risk", "security", "competition" und "growth")
(e)	Raumplanung	Ausschlusszonen für Siedlungsentwicklung ("baseline", "adaptation", "extreme")
(f)	Objektschutz	Objektschutz durch temporäre Maßnahmen ("mobile") oder erhöhte Baukonzepte ("mound")



#### Klimamodelle

Für den Vergleich der Klimamodellergebnisse wurde die Risikokurve der Referenzsimulation sowie der vier gewählten Klimamodellkombinationen aus Globalmodell (GCM) und Regionalmodell (RCM) gegenübergestellt (vgl. Abbildung 10). Die grauen Bereiche geben die Unsicherheitsbandbreite des Risikomodells in Form des 5. und 95. Perzentils aus 100 Simulationswiederholungen wieder.

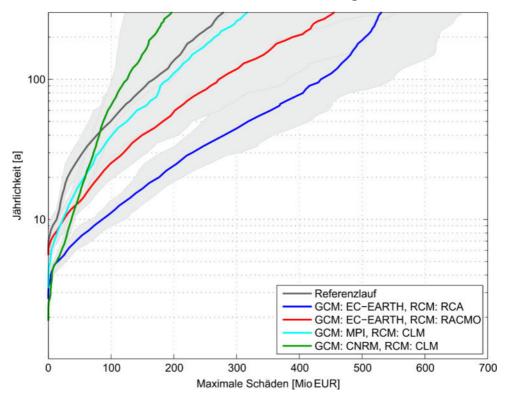


Abbildung 10 Vergleich der Risikokurven für die vier gewählten Klimamodellkombinationen. Alle anderen Aspekte entsprechen der Grundkonfiguration.

Insgesamt ist die Bandbreite der Ergebnisse der einzelnen Klimamodellkombinationen sehr große. Für die Modellkombination CNRM\_CLM wird im Vergleich zu der Referenzsimulation sogar eine Abnahme des Risikos für hohe Wiederkehrperioden festgestellt. Die generelle Tendenz der Simulationsergebnisse zeigt allerdings in Richtung einer Zunahme des Risikos. Für die Auswertung aller weiteren Aspekte wird jeweils der Ensemblemittelwert als auch die Ensemblebandbreite dargestellt.

Die Übereinstimmung der einzelnen Klimamodellkombinationen und insbesondere die Interpretation von absoluten Ergebnissen ist durch eine große Divergenz gekennzeichnet, weshalb diesen Ergebnissen eine **geringe Glaubwürdigkeit** zugewiesen wird.

#### Simulationszeitraum

Für den Vergleich der Simulationszeiträume "Nahe-" und "Ferne Zukunft" wurde der Referenzzeitraum und der Ensemblemittelwert der Risikokurven in Abbildung 11 gegenübergestellt. Der schattierte Bereich gibt die Ergebnisbandbreite der einzelnen Ensemblemitglieder an (vgl. Abbildung 10).



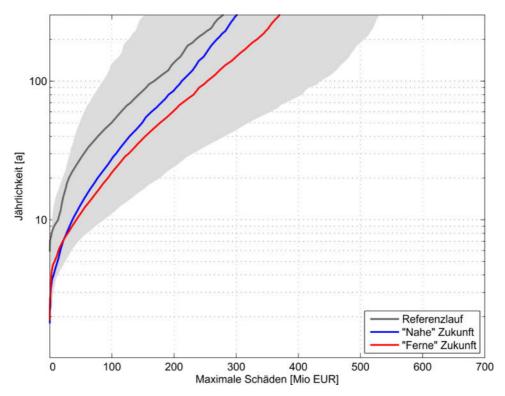


Abbildung 11 Vergleich der Risikokurven für die "Nahe-" und "Ferne Zukunft". Alle anderen Aspekte entsprechen der Grundkonfiguration.

Vergleicht man die Entwicklung des Hochwasserrisikos über den zeitlichen Verlauf zeigen die Ergebnisse der Ensemblemittelwerte sowohl für das Szenario der "Nahen" als auch der "Fernen Zukunft" eine Zunahme des Risikos. Generell sind die einzelnen Szenarien durch eine sehr hohe Variabilität gekennzeichnet. Für das Szenario "Nahe Zukunft" zeigen manche der Ensemblemembers insbesondere für hohe Wiederkehrperioden in Richtung eines sinkenden Risikos. Dies lässt sich damit erklären, dass Teile Vorarlbergs auch in den OEKS15 Daten durch sinkende maximale Tagesniederschläge für die "Nahe Zukunft" charakterisiert sind (*rx1day* Indikator, Chimani *et al.* 2016). Dabei ergibt sich aber kein einheitliches Bild und kann sich je nach Region und Klimamodellkombination unterscheiden. Generell kann für das Szenario "Ferne Zukunft" von steigenden Schäden ausgegangen werden. Die Ergebnisse zeigen eine hohe Sensitivität des Risikomodells hinsichtlich der Veränderungen der Extremwerte. Der Kernaussage, dass in der "Fernen Zukunft" das Risiko höher ist als in der "Nahen Zukunft", wird eine *mittlere Glaub-würdigkeit* zugeordnet.

## Repräsentative Konzentrations-Pfade

Um die verschiedenen Strahlungsantriebe zu vergleichen wurden das Referenzszenario und der Ensemblemittelwert der Risikokurven für die Klimaszenarien 4.5 und 8.5 W/m² in Abbildung 12 dargestellt. Der schattierte Bereich gibt die Ergebnisbandbreite der einzelnen Ensemblemitglieder an.



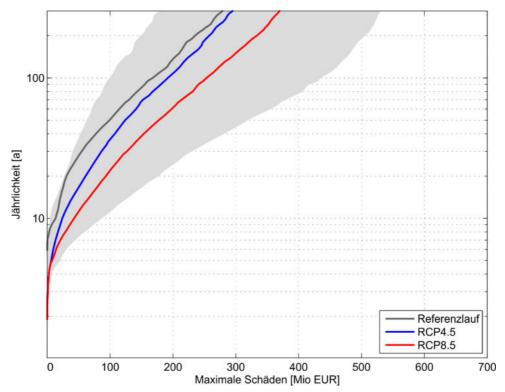


Abbildung 12 Vergleich der Risikokurven für die Emissionsszenarien RCP4.5 und RCP8.5. Alle anderen Aspekte entsprechen der Grundkonfiguration.

Auch wenn die Ergebnisse der Ensemblemittelwerte generell ein höheres Risiko für das Emissionsszenario RCP8.5 suggeriert, können die Ergebnisse nicht als belastbar angesehen werden. Für zwei der vier Modellkombinationen (CNRM\_CLM, MPI\_CLM) liegt ein komplementäres Ergebnis vor (RCP4.5 > RCP8.5). Entsprechend wird das Ergebnis mit **geringer Glaubwürdigkeit** bewertet.

## Sozioökonomische Entwicklung

In Abbildung 13 sind die Risikokurven für die vier betrachteten sozioökonomischen Entwicklungspfade der Landnutzungsmodellierung und der Referenzsimulation gegenübergestellt. Der schattierte Bereich gibt die Ergebnisbandbreite der einzelnen Ensemblemitglieder an.

Die Ergebnisse der verschiedenen zugrundeliegenden sozioökonomischen Entwicklungspfade für die Landnutzungsmodellierung zeigen ein stringentes Bild. Während der Einfluss des Landnutzungswandels auf die Extremabflüsse eher gering ausfällt (vgl. Kapitel 4.6), zeigt die fortschreitende Siedlungsausbreitung in den potenziell gefährdeten Tallagen ein klares Signal hin zu einem Anstieg des Hochwasserrisikos. Der Ensemblemittelwerte des durch die stärkste Siedlungszunahme gekennzeichneten "growth" Szenarios führt entsprechend zu dem stärksten Anstieg des Hochwasserrisikos, wohingegen das konservative "risk" Szenario den geringsten Anstieg verzeichnet. Entsprechend kann die klare Aussage getätigt werden, dass wirtschaftliches Wachstum und zu erwartende Siedlungsentwicklung das Scha-



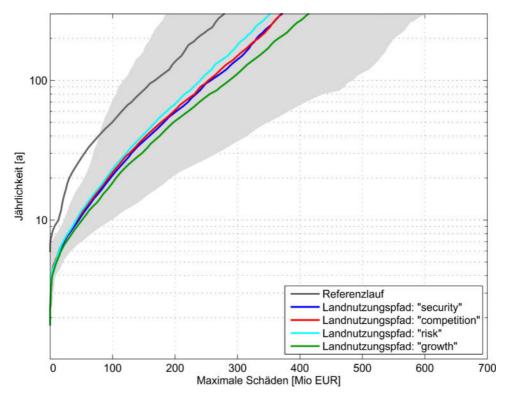


Abbildung 13 Vergleich der Risikokurven für die vier betrachteten sozioökonomischen Entwicklungspfade der Landnutzungsmodellierung. Alle anderen Aspekte entsprechen der Grundkonfiguration.

denspotential in Vorarlberg zukünftig deutlich anheben wird. Durch die Plausibilität und hohe Konsistenz der vorliegenden Ergebnisse wird diese Aussage mit **hoher Glaubwürdigkeit** bewertet.

## Anpassungsmaßnahmen: Raumplanung

Um den Effekt der verschiedenen Raumplanungsmaßnahmen bzw. den theoretischen Effekt keiner effektiven Raumplanung aufzuzeigen, wurden die Risikokurven der drei Varianten ("base", "extreme" und "adaptation") in Abbildung 14 dargestellt. Der schattierte Bereich gibt die Ergebnisbandbreite der einzelnen Ensemblemitglieder an.

Das Ergebnis zeigt, dass Raumplanerische Maßnahmen im Sinne der Ausweisung von Entwicklungsverbotszonen (vgl. Kapitel 4.3) das Risikopotenzial deutlich beeinflussen können. Insbesondere der relativ starke Anstieg des Hochwasserrisikos durch die theoretische Aufweichung der Regularien (Bauverbot in roter Gefahrenzone, Blauzone etc.) zeigt, dass die aktuellen raumplanerischen Vorgaben einen effektiven Beitrag zur Reduzierung des zukünftigen Hochwasserrisikos leisten kann. Eine weitere Verschärfung (Szenario "adaptation") durch ein zusätzliches striktes Entwicklungsverbot in der Gebots- und Vorsorgezone könnte zu einer weiteren Reduzierung beitragen. Die Ergebnisse zeigen ein plausibles Bild und werden daher mit **hoher Glaubwürdigkeit** bewertet.



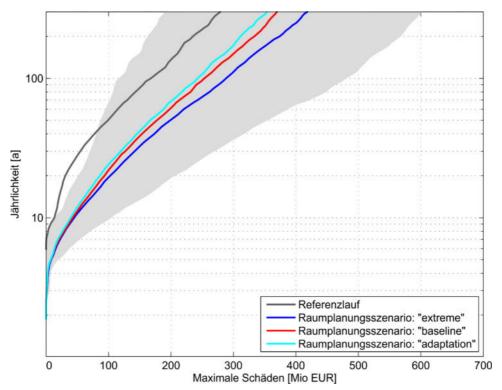


Abbildung 14 Vergleich der Risikokurven der drei berücksichtigten Raumplanungsszenarien (Landnutzungsmodellierung). Alle anderen Aspekte entsprechen der Grundkonfiguration.

#### Anpassungsmaßnahmen: Objektschutz

Abbildung 15 zeigt den Vergleich der Risikokurven unter der theoretischen Annahme von mobilen sowie strukturellen (erhöhtes Bauen) Objektschutzmaßnahmen für zukünftige Siedlungsentwicklungen. Der schattierte Bereich gibt die Ergebnisbandbreite der einzelnen Ensemblemitglieder an.

Im Vergleich zu Raumplanungsmaßnahmen zeigen Objektschutzmaßnahmen nur einen geringeren Effekt auf die Ergebnisse der Risikomodellierung. Dabei werden in den Simulationen Objektschutzmaßnahmen ausschließlich auf neu errichtete Gebäude angewandt. Sie könnten in der Praxis je nach Maßnahme auch am Bestand eingesetzt werden. Generell zeigen die Ergebnisse beider Möglichkeiten ("mobile" und "mound") einen ähnlichen Effekt für niedrige Jährlichkeiten. Für sehr hohe Jährlichkeiten verringert sich die Effektivität des mobilen/flexiblen Hochwasserschutzes. Dies gibt den Umstand wieder, dass sich im Gegensatz zu einer erhöhten Bauweise ("mound"), bei Erreichen der Jährlichkeit des Schutzziels das volle Schadensausmaß an betroffenen Objekten einstellt (vgl. Kapitel 6.6). Für beide Ansätze gilt, dass das Hochwasserrisiko vor allem gegenüber moderateren Hochwassern effektiv verringert werden kann, dieser Effekt aber für extreme Ereignisse deutlich geringer ausfällt.



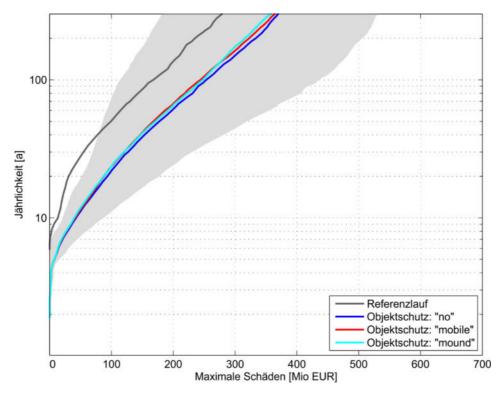


Abbildung 15 Vergleich der Risikokurven der zwei verschiedenen Objektschutzmaßnahmen sowie der Konfiguration ohne Objektschutzmaßnahme. Alle anderen Aspekte entsprechen der Grundkonfiguration.

Zwischen den einzelnen Szenarienläufe ergibt sich zwar ein konsistentes Bild, jedoch zeigen die Ergebnisse nur relativ geringe absolute Abweichungen. Zudem sind die implementierten Ansätze eher konzeptioneller Art, weshalb den Ergebnissen eine *mittlere Glaubwürdigkeit* zugeordnet wird.



# 5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Im Projekt HiFlow-CMA wurde der Frage nachgegangen, inwieweit sich das Hochwasserrisiko im Zuge von Landnutzungsänderungen und Klimawandel zukünftig verändern wird. Als Untersuchungsgebiet wurde Vorarlberg gewählt. Um sich der Fragestellung zu nähern, wurde ein komplexes gekoppeltes Modellierungsframework entwickelt, das sowohl mögliche Klima- als auch mögliche Landnutzungsszenarien berücksichtigt. Die Klima- und Landnutzungsszenarien stellen die Rahmenbedingungen eines sich verändernden hydrologischen Systems (Niederschlag-Abfluss-Modellierung) dar. Darüber hinaus lieferte die räumlich explizite Landnutzungsmodellierung auch die Datengrundlage für das veränderte Schadenspotential. Zudem wurde der Frage nachgegangen, welche Beiträge Objektschutz- und raumplanerische Maßnahmen zur Reduktion des Hochwasserrisikos leisten können.

Für die Hochwasserrisikoanalyse wurden ein Referenzzeitraum sowie ein Simulationszeitraum der "Nahen -" und "Fernen Zukunft" ausgewertet (jeweils 30 Jahre). Um eine aussagekräftige Risikoauswertung sicherzustellen, wurden auf Basis der simulierten Zeitreihen synthetische aber zugleich räumlich plausible Hochwasserszenarien generiert und systematisch ausgewertet. Als finales Ergebnis generiert die komplexe Modellkette Risikokurven, welche die Jährlichkeiten der maximalen Schäden der einzelnen Szenarienkombinationen beschreiben.

Die wesentlichen Projektergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Bezüglich der zukünftigen Niederschlagsverhältnisse und insbesondere Niederschlagsextrema herrscht große Unsicherheit (z.B. Chimani et al. 2016).
   Diese Unsicherheit wird direkt auf die Risikobewertung übertragen und manifestiert sich in einer geringen Übereinstimmung der unterschiedlichen Klimamodellkombinationen. Große Unterschiede und teilweise gegensätzliche Ergebnisse sind zusätzlich für die verschiedenen RCP-Szenarien sowie für die zeitliche Dimension ("Nahe-" und "Ferne Zukunft") festzustellen.
- Die Ergebnisse der verschiedenen Zukunftsszenarien weisen im Vergleich zur Referenzmodellierung, im Mittel auf ein zukünftig erhöhtes Hochwasserrisiko hin. Aufgrund der komplexen Modellkette und Verknüpfung mehrerer Modelle ergeben sich jedoch große Modellunsicherheiten. Hier sind besonders die stark divergierenden Klimamodellergebnisse, die räumliche und zeitliche Disaggregierung der meteorologischen Daten und die Unsicherheiten der Schadensmodelle hervorzuheben. Folglich liegt der Fokus der Studie auf der vergleichenden Betrachtung der verschiedenen Ergebnisse und nicht auf der Interpretation der absoluten Werte.
- Die berücksichtigte dynamische Landnutzungsänderung zeigt in der hydrologischen Modellierung einen nur geringen Effekt auf die Spitzenabflüsse in den Einzugsgebieten. Zum einen wirken die wesentlichen Entwicklungen der Siedlungsausbreitung und der Zuwachs der Waldflächen entgegengesetzt



auf das Abflussgeschehen. Zum anderen fallen die absoluten Änderungsraten auf Einzugsgebietsebene oft nur gering aus. Die Bedeutung der Landnutzungsänderung kann lokal jedoch variieren und ist oftmals stark abhängig von der betrachteten Gebietsgröße (Viglione *et al.* 2016). Die Ergebnisse lassen sich nicht direkt auf andere Fragestellungen wie die Auswirkungen des Oberflächenabflusses, urbane Sturzfluten (Jacobson 2011) oder die Betrachtung der Gesamtwasserbilanzen übertragen (Strasser *et al.* 2019; Speich *et al.* 2020).

- In Vorarlberg kann basierend auf verschiedenen Prognosen (z.B. ÖROK 2009, 2010, 2011) und den ausgewählten Landnutzungsszenarien von einer weiteren Siedlungsentwicklung und Wertsteigerung ausgegangen werden. Dabei zeigen die räumlich explizite Landnutzungsmodellierung einen weiter steigenden Druck auf siedlungsnahe Freiflächen sowie Nachverdichtung insbesondere in den attraktiven Tallagen des Alpenrheins und Walgaus (Sauter et al. 2019). Die soziökonomische Entwicklung zeigt ein klares Signal in Richtung eines steigenden Hochwasserrisikopotenzials für alle Landnutzungsszenarien.
- Schon heute bestehen umfassende raumplanerische Einschränkungen für die Entwicklung neuer Infrastruktur und Siedlungsgebiete. Der Vergleich mit einer theoretischen Aufweichung der Bestimmungen zeigt, dass die aktuellen Maßnahmen wirksam sind und die Aufhebung der Einschränkungen zu erwartende Hochwasserschäden zukünftige merklich steigern könnte. Dem gegenüber wird für Objektschutzmaßnahmen ein positiver Effekt für moderate Hochwasser beigemessen, welcher jedoch für extreme Ereignisse, insbesondere bei mobilen Objektschutzmaßnahmen, entfällt.

Eine Forschungsfrage des Projekts HiFlow-CMA war, inwieweit sich das Hochwasserrisiko in Vorarlberg verändert. Die Projektergebnisse lassen den Rückschluss zu, dass das Hochwasserrisiko in Zukunft wahrscheinlich zunehmen wird. Das erwartete absolute Schadensausmaß kann jedoch aufgrund der hohen Komplexität der Modellkette, der Vielzahl an betrachteten Prozessen und der damit verbundenen Unsicherheiten nicht genau beziffert werden. Die Ergebnisse zeigen, dass hinsichtlich der möglichen monetären Hochwasserschäden an Gebäuden der sozio-ökonomischen Entwicklung und der Siedlungsausbreitung ein hoher Stellenwert zukommt. Um die Fragestellung, welche Anpassungsmaßnahmen zur Reduzierung des Hochwasserrisikos beitragen können, zu beantworten, zeigen die Projektergebnisse insbesondere den positiven und eindeutigen Effekt von langfristigen Raumplanungsmaßnahmen. Auch heute schon implementierte Planungsbeschränkungen können einen wesentlichen Beitrag zur Reduzierung des aktuellen und möglichen zukünftigen Hochwasserrisikos leisten. Durch gesellschaftliche Zielkonflikte können sinnvolle Raumplanungsmaßnahmen jedoch unter Druck geraten.



Grundsätzlich erscheinen sogenannte "no-regret" Maßnahmen im Hochwasserrisi-komanagement sinnvoll und erstrebenswert erscheinen (Klijn *et al.* 2015; EU 2019).

Mit dem entwickelten gekoppelten Ansatz für die Risikoanalyse wurde ein Meilenstein in Richtung einer nicht stationären Betrachtung des Hochwasserrisikos gelegt. Obwohl der vorgestellte Ansatz die Auswirkungen der sozioökonomischen Entwicklung, die Veränderung der Landnutzung und des Klimawandels beinhaltet, werden andere wichtige Aspekte nicht berücksichtigt. Diese beinhalten u.a. die Integration von Infrastrukturschäden, die Berücksichtigung von Dammbruchszenarien oder die Prozesserweiterung auf Oberflächenwasser (Starkniederschläge) zu nennen. Ein wesentliches zukünftiges Entwicklungsziel stellt auch die volle Kopplung der hydrologischen Modellierung mit expliziten hydrodynamischen Berechnungen dar (Grimaldi et al. 2013; Falter et al. 2015; Falter et al. 2016). Dabei könnte auch hier wieder die sich verändernde Landnutzung direkt bei der Ausweisung von Überflutungsflächen berücksichtigt werden. Weiterhin ist es wünschenswert die Unsicherheiten der Modellkette zu reduzieren. Durch fortschreitende Optimierung und höhere Rechenkapazitäten können zukünftig weitere Klimamodellkombinationen berücksichtigt werden ohne sich a priori auf eine Auswahl weniger Modellkombinationen festzulegen. Zudem ist davon auszugehen, dass zukünftige Klimastudien eine höhere räumliche und zeitliche Datenauflösung zur Verfügung stellen können sowie das volle Spektrum an meteorologischen Variablen aufweisen (z.B. Katzav und Parker 2015; Giorgi 2019). Dies wird den Einsatz technisch versierterer Energiebilanzansätze für die hydrologische Modellierung ermöglichen und die Anzahl an benötigten Datenaufbereitungsschritten und damit einhergehenden Unsicherheiten verringern.



# C) Projektdetails

#### 6 Methodik

Im folgenden Kapitel sind vertiefende Erläuterungen sowie Zwischenergebnisse zu einzelnen ausgewallten Teilaspekten des Projektes Hiflow-CMA aufgeführt. Dies beinhaltet methodische Details von der zeitlichen Disaggregierung bis hin zu der modelltheoretischen Implementierung der Anpassungsmaßnahmen.

#### 6.1 Aufbereitung der Klimaszenarien (WP2) - Disaggregierung

Die zeitliche Disaggregierung der meteorologischen Inputdaten basiert auf einer nicht-parametrischen *Resampling* Methode unter Anwendung eines *k-Nearest-Neighbour-*Algorithmus (k-NN) (Winter *et al.* 2019). Hierfür werden die Tageswerte für Temperatur und Niederschlag mit einem Beobachtungsdatensatz verglichen. Anschließend werden k-nächste Nachbarn (Tage), welche die geringsten euklidischen Abstände zwischen Input und beobachteten Daten aufweisen, ausgewählt. Grundsätzlich wird dabei zwischen trockenen und nassen Tagen unterschieden sowie nur Tage ausgewählt welche einen maximalen Datumsunterschied von ±15 Tagen aufweisen. Im nächsten Schritt werden von allen in Frage kommenden Tagen ein Tag zufällig ausgewählt und dessen relatives zeitliches Verlaufsmuster auf die absoluten Werte des Inputdatensatzes übertragen. Dieser Vorgang kann für den gesamten simulierten Datensatz wiederholt werden um eine stündlich disaggregierte Zeitreihe zu erhalten. In Abbildung 21 ist der methodische Ansatz schematisch dargestellt.

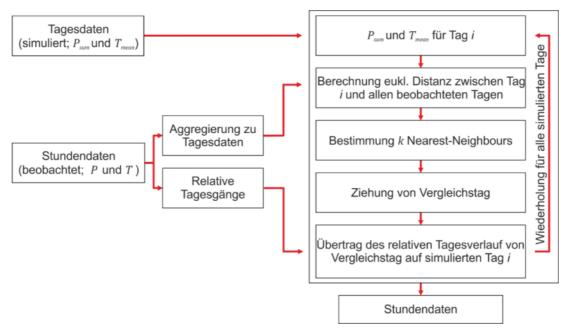


Abbildung 16 Schematische Darstellung des Disaggregierungsansatz (verändert nach Winter et al. 2019).



Als meteorologische Eingangsdaten wurden keine Messdaten die an einem definierten Punkt verortet sind verwendet, sondern kontinuierliche Rasterdaten genutzt. Als Beobachtungsdatensatz wurden INCA Daten zwischen 2003-2016 für die Disaggregierungsanwendung eingesetzt. Der Globalstrahlungsdatensatz wurde getrennt auf Basis des relativen Verlaufs der theoretischen potentiellen Strahlung nach Liston und Elder (2006) bzw. Förster et al. (2016) auf Stundenwerte übertragen.

Um den methodischen Ansatz zu validieren, wurden zunächst der Beobachtungsdatensatz auf Tagesdaten aggregiert und anschließend wieder disaggregiert, wobei ausgeschlossen wird, dass der ursprüngliche Tag als Vergleichstag herangezogen wird. Dabei wurden 100 Realisationen berechnet und der Median verschieden extremer Perzentilwerte der Simulationsläufe mit den entsprechenden Perzentilwerten der Beobachtungsdaten verglichen. Die Ergebnisse sind für Temperatur und Niederschlag in Abbildung 17 dargestellt. Dabei werden zum einen die absoluten Ergebniswerte als auch die absolute Differenz (Beobachteung minus Simulationsergebnis) abgebildet.

Die Ergebnisse für die Temperatur zeigen das die räumlichen topographischen Effekte sehr gut erhalten bleiben. Für das 99. Perzentil liegt eine etwas geringere Temperatur von 0.2 bis 0.4°C der Simulationsergebnisse vor (Abbildung 17a, I). Dies betrifft vor allem für die Tallagen. Auch für die extremsten Temperaturen (Abbildung 17a, II) bleiben die Ergebnisse in einem plausiblen Wertebereich. Abweichungen zwischen Bobachtungsdaten und disaggregierten Daten belaufen sich auf bis zu maximal ±1°C. Für den Vergleich des 99. Perzentils der Niederschlagssummen können die räumlichen Strukturen ebenso gut wiedergegeben werden (siehe Abbildung 17b, I). Es zeigt sich die für das Untersuchungsgebiet typische Ausprägung von deutlich höheren Niederschlägen im Bereich des Bregenzer Walds. Die Abweichungen erreichen einen maximalen Unterschied 0.4 mm/h für das 99. Perzentil bzw. bis 2.5 mm/h für die Extremniederschläge. Für die hohen Niederschläge (siehe Abbildung 17b, II) pausen sich die lokalen Maxima der Stationsdaten wie sie in den Beobachtungsdaten vorhanden deutlich durch. Relativ belaufen sich die Abweichungen auf bis zu maximal 10%. Dabei ist zu berücksichtigen, dass es sich dabei nur um eine andere Verteilung der stündlichen Niederschlagssummen handelt, während die Summe der ursprünglichen Tagesniederschläge bei dem nicht-parametrischen Verfahren erhalten bleibt.

## 6.2 Landnutzungsmodellierung (WP3) - Landnutzungsmodell

Basierend auf den übergeordnet definierten sozio-ökonomischen Szenarien (vgl. Kapitel 4.3) muss die explizite räumliche Ausprägung der Landnutzungsszenarien modelliert werden. Hierfür wurde zunächst das Vorkommen bestimmter Landnutzungsklassen mithilfe eines "Boosted-Regression-Tree"-Frameworks (BRT) modelliert. Identisch zu herkömmlichen Regressionsmethoden, wird dabei eine Zielvariable (Landnutzugsklasse) auf Basis verschiedener Eingangsvariablen vorherge-



sagt. Eingangsgrößen sind verschiedene, hauptsächlich räumliche biophysikalische- (z.B. Geländecharakteristik wie Steigung oder Hangausrichtung) und sozio- ökonomische Determinanten (z.B. Entfernung zu Infrastruktur oder regionalen Zentren).

#### a) Temperatur [°C]

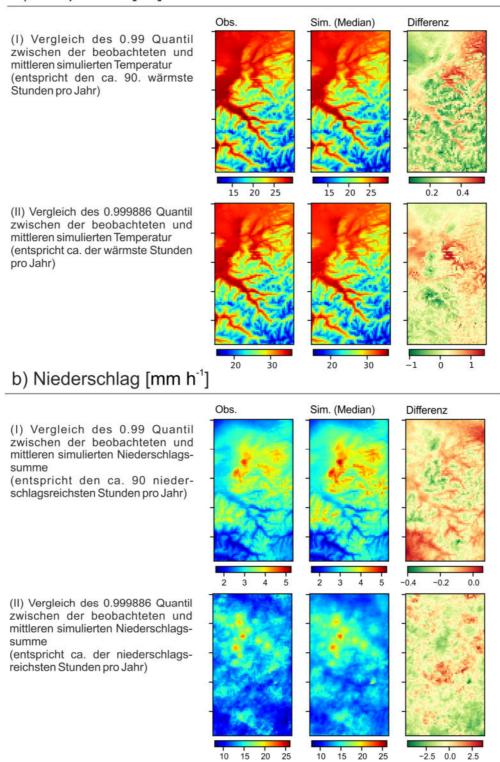


Abbildung 17 Karten von Vorarlberg der absoluten Abweichungen der Disaggregierungsanwendung. Hierfür wurden die Beobachtungsdaten aggregiert und wieder auf Stundendaten heruntergebrochen. Der Vergleich bezieht sich auf den Median von 100 Disaggregationsläufen.



Das BRT Verfahren hat gegenüber anderen Regressionsmethoden jedoch mehrere Vorteile. Der Ansatz ermöglicht unter anderem (i) die Abbildung nichtlineare Beziehung, (ii) die Möglichkeit Multikollinearität zu berücksichtigen sowie (iii) Verfahren des maschinellen Lernens zur iterativen Verbesserung des Modells zu nutzen (Friedman 2002; Elith *et al.* 2008). Die Methodik wurde zum Beispiel erfolgreich für die Modellierung von Agrarflächenwandel (Müller *et al.* 2013; Smaliychuk *et al.* 2016), Waldveränderungen (Bolliger *et al.* 2017; Smaliychuk *et al.* 2016) oder des allgemeinen Landnutzungswandels (Pazúr und Bolliger 2017; Sauter *et al.* 2019) eingesetzt. Das Ergebnis des BRT-Frameworks sind Wahrscheinlichkeitsoberflächen die beschreiben wie wahrscheinlich das Auftreten oder Nichtvorhandensein einer bestimmten Landnutzungsklasse ist.

Aufbauend auf den entwickelten Wahrscheinlichkeitsoberflächen und den benötigten Landnutzungsänderungen (Demand-Szenarien) wurde die eigentliche räumliche Ausprägung über ein iteratives Verfahren modelliert. Dabei werden unbebaute und bebaute Landnutzungsklassen individuell berücksichtigt. Bei bebauten Landnutzungsklassen wird neben den Wahrscheinlichkeitsoberflächen auch die lokale Struktur, wie das Clustern von Gebäuden in dicht besiedelten Bereichen oder eine lockere Bebauung von Einfamilienhäusern berücksichtigt. Der komplexe Ansatz der Landnutzungsmodellierung inklusive Eingangsdaten und Zwischenergebnissen ist in Abbildung 18 dargestellt.

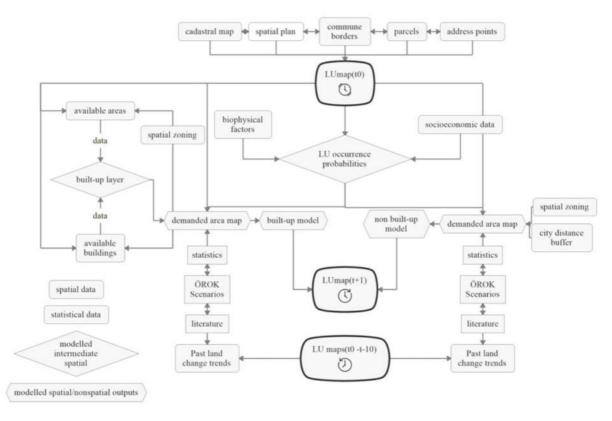


Abbildung 18 Komplexe Struktur der räumlichen Landnutzungsmodellierung inklusive Eingangsdaten und Zwischenergebnissen (Komplementäre Materialien, Sauter et al. 2019).



## 6.3 Hydrologische Modellierung (WP4) - Kalibrierung und Validierung

Die Kalibrierung der hydrologischen Teilmodelle erfolgte durch eine globale Parameteroptimierung. Hierfür wurde der Differential Evolution (DE) Algorithmus nach Storn und Price (1997) in Umsetzung der Python Open-Source-Bibliothek für wissenschaftliches Rechnen, SciPy, genutzt (Virtanen *et al.* 2019).

Die multikriterielle Zielfunktion ( $E_{opt}$ ) wurde als die Übereinstimmung zwischen Simulation und Beobachtung des (i) Gesamtzeitraums sowie (ii) der Übereinstimmung des Hochwasserereignisses August 2005 (3-Tagesfenster) definiert. Die Bewertung der Zielfunktion wurde über das weit verbreitete Gütemaß, der Nash-Shutcliff Effizienz (NSE), bestimmt (Nash und Sutcliffe 1970). Dabei wurden je nach Einzugsgebiet und Datenqualität mehrere Pegelmessstellen (n) pro Teilmodell berücksichtigt:

$$E_{opt} = \frac{\sum_{i=0.7}^{n} 0.7 * NSE_{gesamt_i} + 0.3 * NSE_{event05_i}}{n}$$

Der Kalibrierzeitraum erstreckt sich von 01.01.2004 bis 31.12.2010, wobei zusätzlich ein Jahr Modellvorlauf für die Initialisierung der hydrologischen Modelle gerechnet wurde. Der Validierzeitraum wurde zwischen 01.01.2011 bis 31.12.2016 definiert. In Tabelle 3 sind die Ergebnisse der Kalibrierung und Validierung dargestellt. Die Einzugsgebiete sind in der Übersichtskarte Abbildung 5 zu finden. Neben dem NSE ist zusätzlich der Kling Gupta Koeffizient (KGE; Kling  $et\ al.\ 2012$ ) als Qualitätskriterium aufgeführt.

Tabelle 3 Resultate der Kalibrierung und Validierung für aller Einzugsgebiete (EZG).

		NSE		KGE	
Messtelle	EZG	Kalib.	Valid.	Kalib.	Valid.
Kennelbach	BA	0,70	0,73	0,63	0,70
Thal	BA	0,46	0,70	0,44	0,68
Mellau	BA	0,65	0,63	0,73	0,66
Au	BA	0,64	0,65	0,72	0,73
Hopfreben	BA	0,48	0,54	0,58	0,63
Lingenau	BA	0,62	0,42	0,63	0,36
Schönenbach	BA	0,65	0,67	0,75	0,72
Lauterach	DA	0,88	0,87	0,85	0,91
Hoher Steg	DA	0,81	0,82	0,82	0,89
Enz	DA	0,76	0,75	0,80	0,81
Sulz	FU	0,63	0,78	0,42	0,50
Laterns	FU	0,68	0,81	0,73	0,83
Gisingen	IL	0,14	0,22	0,42	0,52
Garsella	IL	0,57	0,62	0,65	0,71
Klösterle	IL	0,26	0,66	0,39	0,64
Schruns	IL	0,42	0,69	0,56	0,73
Bürs	IL	0,74	0,74	0,81	0,83
Lech	LE	0,49	0,46	0,55	0,55
Lech Tannbergbrück	LE	0,58	0,6	0,63	0,65
Unterhochsteg	LB	0,61	0,68	0,62	0,75
Mittelwert		0,59	0,65	0,64	0,69



# 6.4 Risikomodellierung (WP5) - Wertedefinition und Übertragung

Für die Risikobewertung müssen durchschnittliche Werte pro Landnutzungskategorie abgeleitet werden. Dabei wurden wie vorgesehen, nur Gebäudekategorien berücksichtigt. Folgende bebaute Kategorien werden in der Landnutzungsmodellierung explizit ausgewiesen:

Kategorie	Name
EF	Einfamilienhäuser
MF	Mehrfamilienhäuser
GW	Gewerbegebäude
IN	Industriegebäude
LW	Landwirtschaftliche Gebäude

Tabelle 4 Berücksichtigte Landnutzungs-/ Objektkategorien.

Aus den vorangegangenen Forschungsprojekten INSURE I und II, die am alpS-Centre for Climate Change Adaptation und dem Institut für Geographie der Universität Innsbruck durchgeführt wurden, steht ein Gebäudewertkatalog aus Objektpolygonen für die Bearbeitung zur Verfügung. Dieser basiert auf der Übertragung von durchschnittlichen Gebäudekubaturwerten aus Versicherungsdaten für das gesamte Untersuchungsgebiet (Huttenlau *et al.* 2015).

Für die Übertragung der Werte wurden die Objektwerte (Bezugsjahr 2013) zunächst in Rasterdaten umgewandelt. Dabei wurde der Objektwert auf die Anzahl der resultierenden Rasterzelle aliquot aufgeteilt. Anschließend konnte für jede Rasterkategorie (vgl. Tabelle 4) ein durchschnittlicher Wert berechnet werden. Für die Kategorie Einfamilienhäuser (EF) wurden unrealistisch große Objekte (>20x20m) in die Klasse Mehrfamileinhäuser (MF) re-klassifiziert. Anschließend konnten allen Rasterzellen der entsprechende Klassendurchschnittswert zugewiesen werden. Der Inventarwert wurde in Relation des bestimmten Strukturwerts angenommen (Borter 1999).

Neben der Werteübertragung wurde eine fortschreitende Werteanpassung (Anpassungsfaktor) auf Basis des Baupreisindex auf das Bezugsjahr des Basisdatensatzes der Landnutzung (2016) vorgenommen (Statistik Austria 2019a):

$$An passungs faktor = \frac{148,0\; (2016,Q1)}{139,1\; (2013,\; Q1)} = 1.064$$

Um den Effekt der Übertragung zu überprüfen wurden die Gesamtobjektwerte aus den durchschnittlichen Rasterdaten mit den ursprünglichen Objektdaten verglichen. Die Ergebnisse des Vergleichs sind in Abbildung 19 dargestellt. Generell zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen Einzelobjekten und generalisierten Rasterdaten. Die Standardabweichung fällt dabei jedoch sehr hoch aus wobei für Einzelne Ausreiser auch Abweichungen von 50% und mehr erreichen werden. Für den



Vergleich der Kategorie der Einfamilienhäuser (EF) ist klar die definitorische Grenze für unrealistisch große Objekte zu sehen, welche effektiv den maximalen Strukturwert in der Klasse bestimmt (vgl. Abbildung 19, EF). Generell sollte das eingesetzte Verfahren durch die grundsätzlich hohe Standartabweichung nur für kumulative Betrachtungen über eine Vielzahl von Objekten genutzt werden. Durch die meso-skalige Betrachtung (gesamtes Bundesland Vorarlberg) und der damit verbundenen großen Anzahl an Gebäuden gleichen sich die punktuellen Fehler aus und es kann von plausiblen und robusten Ergebnissen bei der Werteübertragung ausgegangen werden. Kleinräumige, hier nicht näher untersuchte lokale Betrachtungen sind hingegen mit großen Unsicherheiten behaftet.

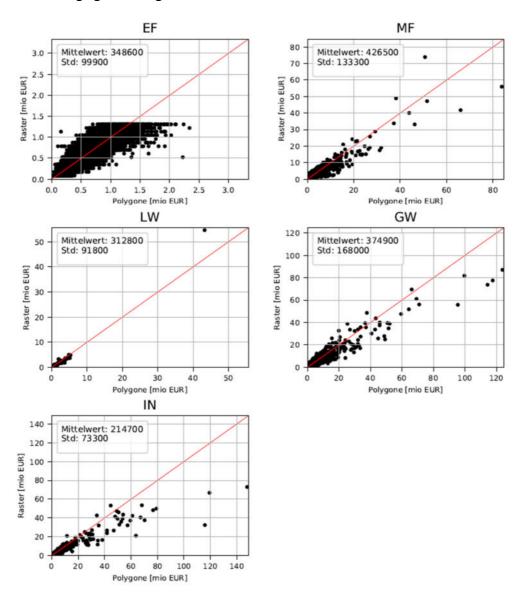


Abbildung 19 Vergleich der Gesamtobjektwerte aus den durchschnittlichen Rasterdaten und den ursprünglichen Objektdaten. Die angegebenen Mittelwerte bzw. Standartabweichungen (Std) beziehen sich auf die Rasterwerte.



#### 6.5 Risikomodellierung (WP5) - Schadensfunktionen

Bei einer detaillierteren Betrachtung der Modellunsicherheiten bzw. einer Sensitivitätsauswertung einzelner Komponenten des Risikomodells wurde unter anderem die Auswirkung unterschiedlicher Schadensfunktionen auf die Risikoabschätzung untersucht (Winter et al. 2018). Eine Schadensfunktion beschreibt das Schadensausmaß an einem Gebäude bzw. Objekt in Abhängigkeit prozessbeschreibender Parameter. Vielfach wird eine einfache Beschreibung des relativen Schadens in Abhängigkeit der vorherrschenden Wassertiefe während eines Hochwasserereignisses eingesetzt. Die Auswertung zeigt, dass die Wahl der Schadensfunktion zu den höchsten Unsicherheiten beitragen (Winter et al. 2018). Wie in Abbildung 20 dargestellt findet sich bei dem ausgewerteten Ensemble von sechs Funktionen ein Faktor von drei zwischen niedrigstem und höchstem Wert bei der Betrachtung von Wohngebäude. Ein möglicher zur Präzisierung der Abschätzung ist die Erstellung lokaler Schadensfunktionen, die jedoch aufgrund einer fehlenden Datenbasis nicht möglich war. Jedoch konnten Huttenlau et al. (2015) zeigen, dass das Schadensmodell von BUWAL zu sehr guten Ergebnissen im Untersuchungsgebiet Vorarlberg führt. Daher wurde als einheitliche Vergleichsbasis für die folgenden Analysen die Schadensfunktion BUWAL (Borter 1999) festgelegt. Die absoluten Risikosummen sind im Zusammenhang mit der Wahl einer Schadensfunktion, aber auch durch die Kombination einer Vielzahl an Simulationsschritten (Landnutzungsszenarien, Klimaszenarien, Disaggregierung, Hydrologische Modellierung) mit großen Unsicherheiten verbunden. Der Fokus der Interpretation liegt daher auf dem relativen Vergleich einzelner Ergebnisse anstelle absoluter Werte.

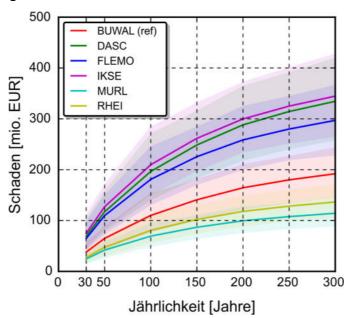


Abbildung 20 Unsicherheitsbandbreite durch Verwendung unterschiedlicher Schadensfunktionen. Die schattierten Bereiche geben die Unsicherheitsbandbreite durch 100 Simulationsrealisationen wieder (verändert nach Winter et al. 2018).



#### 6.6 Anpassungsmaßnahmen (WP6) - Objektschutzmaßnahmen

Neben Raumplanungsmaßnehmen gelten auch Objektschutzmaßnahmen als geeignete Maßnahmen das Hochwasserrisiko zu reduzieren. Dies kann sowohl durch temporare Lösungen wie Barrieren oder Versiegelungen gegenüber dem Wassereintritt, als auch durch konstruktive Maßnahmen wie eine generell erhöhte Bauweise bzw. Gebäude auf Stelzen erreicht werden (Kelman und Spence 2004; ÖWAV 2013). Temporären Maßnahmen können, sofern die Vorwarnzeit ausreichend lange ist, einen sehr effizienten Schutz bieten, solange das Hochwasserereignis das Schutzziel nicht übertrifft. Wird das Schutzziel überströmt, kommt es oft zu einem Totalversagen und das volle Schadensausmaß stellt sich ein. Im Gegensatz dazu wird bei präventiven konstruktiven Maßnahmen durch eine konsequente Ausweichstrategie das Schadenspotenzial auch bei Wasserständen oberhalb des Schutzziels reduziert. Entsprechend wurden für das Projekt HiFlow-CMA die theoretische Ansätze Objektschutz Temporär ("mobile") sowie Objektschutz Erhöhtes Bauen ("mound") modelltheoretisch abgebildet.

Das Konzept entspricht dem Vorgehen nach Achleitner et al. (2016), wobei das Schutzziel über die Anschlagslinie und Wasserstand des HQ100 Ereignisses definiert wurden. Zusätzlich wird ein Sicherheitsaufschlag von 20 cm veranschlagt (HQ100+20 cm) (Achleitner et al. 2016). Dabei wurden die eingesetzten Schadensfunktionen für temporären Objektschutzmaßnahmen so modifiziert, dass kein Schaden entsteht bis das Schutzziel erreicht wird, dieser ab dann aber voll eintritt. Für konstruktive Objektschutzmaßnahmen (Strategie Ausweichen) wurde die gesamte Schadensfunktion verschoben. Das methodische Vorgehen und zugrundeliegende Annahmen sind in Abbildung 21 schematisch dargestellt. Grundsätzlich wurden jedoch nur neu entwickelte Strukturen (Landnutzungsszenarien) berücksichtigt, während der Bestand mit den ursprünglichen Schadensfunktionen bewertet wurde.

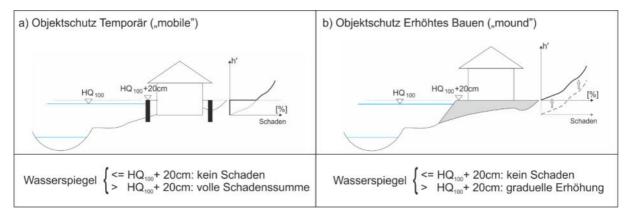


Abbildung 21 Schematische Abbildung der implementierten Objektschutzmaßnahmen durch Anpassung der Schadensfunktionen (verändert nach Achleitner et al. 2016).



#### 6.7 Anpassungsmaßnahmen (WP6) - Raumplanung

Es wurden drei unterschiedliche Szenarien für Entwicklungsverbotszonen definiert, die hinsichtlich der Bauverbotszonen unterschiedlich strikt sind. Zunächst wurde ein "baseline" Szenario bestimmt, welches weitgehend die momentan bestehenden gesetzlichen Bestimmungen beinhaltet. Dies umfasst ein Siedlungsentwicklungsverbot im Bereich der Natura2000 Gebiete sowie den nationalen Naturschutzgebieten (LGBI. Nr. 22/1997), Wasserschutzgebiete, die Landesspezifische Blauzonen (Freiflächen zum Schutz vor Hochwasser) (LGBI. Nr. 1/2014) und Landesgrünzonen (geschützte und reservierte Freiflächen) (LGBI. Nr. 9/1977) sowie den Bereich der roten Gefahrenzone (BGBI. Nr. 436/1976). Als "adaptation" Szenario wurde neben den genannten Einschränkungen auch die Siedlungsentwicklungen

innerhalb der gelben Gefahrenzone (Gebots- und Vorsorgezone) ausgeschlossen. Zum heutigen Zeitpunkt sind Entwicklungen innerhalb der gelben Risikozone eigentlich unter Vorsorgeauflagen gestattet. Im Kontrast dazu wurde ein offenes "extremes" Szenario definiert, in welchem generell keine Entwicklungsverbote zur Anwendung kommen. Diese theoretische Annahme soll aufzeigen, welchen Effekt eine Liberalisierung der heute geltenden Bebauungsbeschränkungen bedeuten würde. In Abbildung 22 sind die verschiedenen Beschränkungen verortet sowie tabellarisch die drei definierten Szenarien "extreme", "baseline" "adaptation" aufgeführt. Schon bestehende Strukturen bleiben von den Annahmen unberührt (Bestandsschutz).

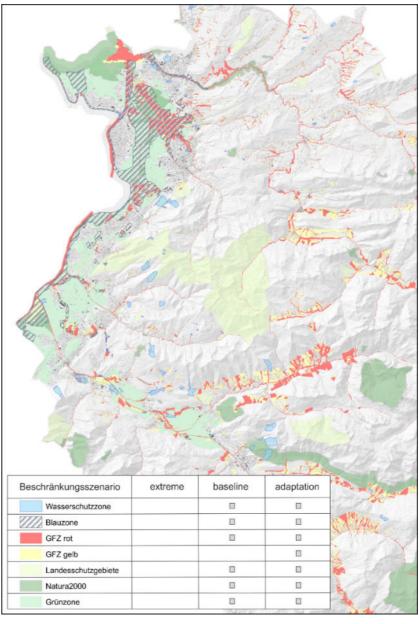


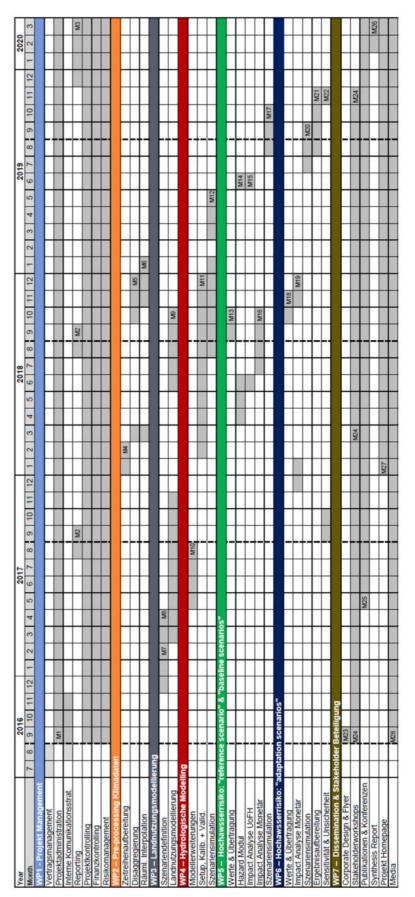
Abbildung 22 Übersicht der verschiedenen Beschränkungszonen inklusive tabellarischer Überblick der drei Beschränkungsszenarien.

HiFlow-CMA Endbericht



# 7 Arbeits- und Zeitplan

Das Projekt HiFlow-CMA im September startete 2016 mit einer Projektlaufzeit von 3 Jahren und wurde inhaltlich, nach einer kostenneutralen Projektverlängerung, im Dezember 2019 abgeschlossen. Der Zeitplan der einzelnen Arbeitspakete kann dem Gantt-Diagramm entnommen werden.





# 8 Publikationen und Disseminierungsaktivitäten

#### Wissenschaftliche Veröffentlichungen (peer reviewed)

Winter, B.; Schneeberger, K. and Vorogushyn, S. (2020) Event generation for probabilistic flood risk modelling: multi-site peak flow dependence model vs weather generator based approach. Natural Hazards and Earth System Science Discussion. DOI: 10.5194/nhess-2019-340.

Sauter, I.; Kienast, F.; Bolliger, J.; Winter, B.; Pazur R. (2019) Changes in demand and supply of ecosystem services under scenarios of future land use in Vorarlberg, Austria. Journal of Mountain Science, 2793-2809. DOI: 10.1007/s11629-018-5124-x.

Winter, B.; Schneeberger, K.; Dung, N.V., Huttenlau, M.; Achleitner, S.; Stötter, J.; Merz, B. and Vorogushyn, S. (2019) A continuous modelling approach for design flood estimation on sub-daily time scale. Hydrological Sciences Journal 88, 1–16. DOI: 10.1080/02626667.2019.1593419.

Winter, B.; Schneeberger, K.; Huttenlau, M. and Stötter, J. (2018) Sources of uncertainty in a probabilistic flood risk model. Natural Hazards, 431–446. DOI: 10.1007/s11069-017-3135-5.

#### Wissenschaftliche Konferenz- und Tagungsbeiträge

#### Vorträge

Winter, B.; Schneeberger, K.; Pazur, R.; Georges, C.; Huttenlau, M.; Achleitner, S.; Bolliger, J. (2019) Flood risk under climate and land use changes – a coupled modelling framework in an alpine study area; System-Risk Conference 2019. 17.-19. September 2019, Potsdam.

Huttenlau, M.; Schneeberger, K.; Winter, B.; Pazur, R., Achleitner, S.; Bolliger J. (2018) HiFlow-CMA – High Resolution Flood Risk Assessment for Climate Change Adaptation with a Coupled Modelling Approach. 19. Österreichischer Klimatag, 22.-25. April 2018, Salzburg (Kurzvortrag inkl. Diskussion mit dem ACRP Steering Commitee).

Pazur, R.; Bolliger, J.; Huttenlau, M.; Schneeberger, K.; Winter, B.; Achleitner, S. (2017) Implementing spatial plans into modelling studies of flood risk in an Alpine region. IALE 2017 European Landscape Ecology Congress: From pattern and process to people and action, 12.-15. Sept 2017, Ghent.

#### Posterbeiträge

Schneeberger, K.; Winter, B.; Huttenlau, M.; Pazur, R.; Achleitner, S.; Bolliger, J. (2019) Neubewertung des Hochwasserrisikos unter zukünftigen Klima- und Landnutzungsänderungen; 20. Österreichischer Klimatag, 24.-27. April 2019, Wien.



Winter, B., Schneeberger, K., Huttenlau, M., Pazur R., Achleitner, S., Bolliger, J. (2018) HiFlow-CMA - High Resolution Flood Risk Assessment for Climate Change Adaptation with a Coupled Modelling Approach. Flussbautagung 2018. 10.-12. Oktober 2018. Graz.

Huttenlau, M.; Schneeberger, K.; Winter, B.; Pazur, R., Achleitner, S.; Bolliger J. (2018) HiFlow-CMA – High Resolution Flood Risk Assessment for Climate Change Adaptation with a Coupled Modelling Approach. 19. Österreichischer Klimatag, 22.-25. April 2018, Salzburg.

Huttenlau, M.; Schneeberger, K.; Winter, B.; Pazur, R., Achleitner, S.; Bolliger J. (2017) Ein gekoppelter transdisziplinärer Modellierungsansatz zur Analyse des Hochwasserrisikos unter sich verändernden Umweltbedingungen; 18. Österreichischer Klimatag, 22.-24. Mai 2017, Wien.

Huttenlau, M.; Schneeberger, K.; Winter, B.; Pazur, R., Achleitner, S.; Bolliger J. (2017) Comparative analysis of flood risk evolution considering changes in climate, hydrology, and socio-economy; 3rd European Climate Change Adaptation Conference, 5.-9. Juni 2017, Glasgow.

Huttenlau, M.; Schneeberger, K.; Winter, B.; Pazur, R., Achleitner, S.; Bolliger J. (2017) Flood risk in a changing world – a coupled transdisciplinary modelling framework for flood risk assessment in an Alpine study area; European Geoscience Union, General Assembly 2017, 23.-28. April 2017, Wien.

#### Sonstige Disseminierungsaktivitäten

Winter, B. (2019) Flood Risk Modelling: Development and Comparison of two Approaches for Heterogeneous Flood Event Generation in Alpine Catchments. Dissertation. Universität Innsbruck. urn:nbn:at:at-ubi:1-55901.

Sauter, I. (2018) The effects of land use change on ecosystem services in a mountainous region. Masterarbeit. ETH Zürich und WSL Birmensdorf. <a href="https://www.wsl.ch/en/publications/the-effects-of-land-use-change-on-ecosys-tem-services-in-a-mountainous-region.html">https://www.wsl.ch/en/publications/the-effects-of-land-use-change-on-ecosys-tem-services-in-a-mountainous-region.html</a>.

Soder, N. (2018) Überschwemmungen durch Oberflächenabfluss in Vorarlberg: Differenzierung von Gebäudeschäden und Implikationen für das Hochwasserrisikomanagement. Masterarbeit. Universität Innsbruck. <a href="http://diglib.uibk.ac.at/ul-btirolhs/content/titleinfo/2769345">http://diglib.uibk.ac.at/ul-btirolhs/content/titleinfo/2769345</a>.

Projekt Webseite. <a href="http://hiflow.at">http://hiflow.at</a>

Landnutzungsszenarien (<a href="http://hiflow.at">http://hiflow.at</a>)

Synthesis Report (<a href="http://hiflow.at">http://hiflow.at</a>)



#### Literaturverzeichnis

- Achleitner, S.; Huttenlau, M.; Winter, B.; Reiss, J.; Plörer, M.; Hofer, M. (2016): Temporal development of flood risk considering settlement dynamics and local flood protection measures on catchment scale. An Austrian case study. In: *International Journal of River Basin Management*, S. 1–17. DOI: 10.1080/15715124.2016.1167061.
- Achleitner, S.; Schöber, J.; Rinderer, M.; Leonhardt, G.; Schöberl, F.; Kirnbauer, R.; Schönlaub, H. (2012): Analyzing the operational performance of the hydrological models in an alpine flood forecasting system. In: *J. Hydrol.* 412-413, S. 90–100. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2011.07.047.
- BGBI. Nr. 436/1976: Gesamte Rechtsvorschrift für Gefahrenzonenpläne. In: BGBI (436).
- Blöschl, G.; Blaschke, A.P.; Haslinger, K.; Hofstätter, M.; Parajka, J.; Salinas, J.; Schöner, W. (2018): Auswirkungen der Klimaänderung auf Österreichs Wasserwirtschaft ein aktualisierter Statusbericht. In: *Österr Wasser- und Abfallw* 70 (9-10), S. 462–473. DOI: 10.1007/s00506-018-0498-0.
- Blöschl, G.; Gaál, L.; Hall, J.; Kiss, A.; Komma, J.; Nester, T. et al. (2015): Increasing river floods: fiction or reality? In: WIREs Water 2 (4), S. 329–344. DOI: 10.1002/wat2.1079.
- Blöschl, G.; Hall, J.; Viglione, A.; Perdigão, R.A.P.; Parajka, J.; Merz, B. et al. (2019): Changing climate both increases and decreases European river floods. In: *Nature* 18, S. 2735. DOI: 10.1038/s41586-019-1495-6.
- Blöschl, G.; Nester, T.; Komma, J.; Parajka, J.; Perdigão, R. A. P. (2013): The June 2013 flood in the Upper Danube Basin, and comparisons with the 2002, 1954 and 1899 floods. In: *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17 (12), S. 5197–5212. DOI: 10.5194/hess-17-5197-2013.
- BMLFUW (Hg.) (2004): Analyse der Hochwasserereignisse vom August 2002 FloodRisk. Synthesebericht.
- Bolliger, J.; Schmatz, D.; Pazúr, R.; Ostapowicz, K.; Psomas, A. (2017): Reconstructing forest-cover change in the Swiss Alps between 1880 and 2010 using ensemble modelling. In: *Reg Environ Change* 17 (8), S. 2265–2277. DOI: 10.1007/s10113-016-1090-4.
- Borter, P. (1999): Risikoanalyse bei gravitativen Naturgefahren. Fallbeispiele und Daten. Bern (Naturgefahren).
- Cammerer, H.; Thieken, A.H. (2013): Historical development and future outlook of the flood damage potential of residential areas in the Alpine Lech Valley (Austria) between 1971 and 2030. In: *Reg Environ Change* 13 (5), S. 999–1012. DOI: 10.1007/s10113-013-0407-9.
- Cammerer, H.; Thieken, A.H.; Verburg, P.H. (2013): Spatio-temporal dynamics in the flood exposure due to land use changes in the Alpine Lech Valley in Tyrol (Austria). In: *Nat Hazards* 68 (3), S. 1243–1270. DOI: 10.1007/s11069-012-0280-8.
- Chimani, B.; Heinrich G.; Hofstätter M.; Kerschbaumer M.; Kienberger S.; Leuprecht A. et al. (2016): ÖKS15 Klimaszenarien für Österreich. Daten Methoden Klimaanalyse. Projektendbericht. Wien. Online verfügbar unter https://data.ccca.ac.at/dataset/endbericht-oks15-klimaszenarien-fur-osterreich-daten-methoden-klimaanalyse-v01.
- Chimani, B.; Matulla, C.; Eitzinger, J.; Hiebl, J.; Hofstätter M.; Kubu, G. et al. (2018): Guideline. zur Nutzung der ÖKS15-Klimawandelsimulationen sowie der entsprechenden gegitterten Beobachtungsdatensätze.
- Dastorani, M.; Koochi, J.; Darani, H.S. (2013): River instantaneous peak flow estimation using daily flow data and machine-learning-based models. In: *Journal of Hydroinformatics*, S. 1089–1098. DOI: 10.2166/hydro.2013.245.
- Di Baldassarre, G.; Sivapalan, M.; Rusca, M.; Cudennec, C.; Garcia, M.; Kreibich, H. et al. (2019): Sociohydrology: Scientific Challenges in Addressing the Sustainable Development Goals. In: *Water Resour. Res.* 55 (8), S. 6327–6355. DOI: 10.1029/2018WR023901.
- Di Baldassarre, G.; Viglione, A.; Carr, G.; Kuil, L.; Yan, K.; Brandimarte, L.; Blöschl, G. (2015): Debates-Perspectives on socio-hydrology: Capturing feedbacks between physical and social processes. In: *Water Resour. Res.* 51 (6), S. 4770–4781. DOI: 10.1002/2014WR016416.
- Dobler, C.; Pappenberger, F. (2013): Global sensitivity analyses for a complex hydrological model applied in an Alpine watershed. In: *Hydrol. Process.* 27 (26), S. 3922–3940. DOI: 10.1002/hyp.9520.
- Elith, J.; Leathwick, J.R.; Hastie, T. (2008): A working guide to boosted regression trees. In: *The Journal of animal ecology* 77 (4), S. 802–813. DOI: 10.1111/j.1365-2656.2008.01390.x.
- Elmer, F.; Hoymann, J.; Düthmann, D.; Vorogushyn, S.; Kreibich, H. (2012): Drivers of flood risk change in residential areas. In: *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 12 (5), S. 1641–1657. DOI: 10.5194/nhess-12-1641-2012.



- Elshafei, Y.; Sivapalan, M.; Tonts, M.; Hipsey, M.R. (2014): A prototype framework for models of socio-hydrology. Identification of key feedback loops and parameterisation approach. In: *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 18 (6), S. 2141–2166. DOI: 10.5194/hess-18-2141-2014.
- EU (2007): über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken. Richtilinie 2007/60/EC des Europäischen Parlaments und des Rates, vom 23.10.2007. In: *Amtsblatt der Europäischen Union* L 288/27.
- EU (2019): European Overview Flood Risk Management Plans. Online verfügbar unter https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=SWD:2019:0031:FIN:EN:PDF, zuletzt geprüft am 13.10.2019.
- Falter, D.; Dung, N.V.; Vorogushyn, S.; Schröter, K.; Hundecha, Y.; Kreibich, H. et al. (2016): Continuous, large-scale simulation model for flood risk assessments: proof-of-concept. In: *J. Flood Risk Manage* 9 (1), S. 3–21. DOI: 10.1111/jfr3.12105.
- Falter, D.; Schröter, K.; Dung, N.V.; Vorogushyn, S.; Kreibich, H.; Hundecha, Y. et al. (2015): Spatially coherent flood risk assessment based on long-term continuous simulation with a coupled model chain. In: *J. Hydrol.* 524, S. 182–193. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.02.021.
- Federer, C.A.; Lash, D. (1978): BROOK: a hydrologic simulation model for eastern forests. New Hampshire (University of New Hampshire Water Resource Research Report, 19).
- Förster, K.; Hanzer, F.; Winter, B.; Marke, T.; Strasser, U. (2016): An open-source MEteoroLOgical observation time series DISaggregation Tool (MELODIST v0.1.1). In: *Geosci. Model Dev.* 9 (7), S. 2315–2333. DOI: 10.5194/gmd-9-2315-2016.
- Friedman, J.H. (2002): Stochastic gradient boosting. In: *Computational Statistics & Data Analysis* 38 (4), S. 367–378. DOI: 10.1016/S0167-9473(01)00065-2.
- Giorgi, F. (2019): Thirty Years of Regional Climate Modeling: Where Are We and Where Are We Going next? In: *J. Geophys. Res. Atmos.* 92 (7), S. 365. DOI: 10.1029/2018JD030094.
- Grimaldi, S.; Petroselli, A.; Arcangeletti, E.; Nardi, F. (2013): Flood mapping in ungauged basins using fully continuous hydrologic–hydraulic modeling. In: *Journal of Hydrology* 487, S. 39–47. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.02.023.
- Habersack, H.; Krapesch, G. (2006): Hochwasser 2005 Ereignisdokumentation. der Bundeswasserbauverwaltung, des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinenverbauung und des Hydrographischen Dienstes.
- Haiden, T.; Kann, A.; Wittmann, C.; Pistotnik, G.; Bica, B.; Gruber, C. (2011): The Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis (INCA) System and Its Validation over the Eastern Alpine Region. In: *Wea. Forecasting* 26 (2), S. 166–183. DOI: 10.1175/2010WAF2222451.1.
- Heffernan, J.E.; Tawn, J.A. (2004): A conditional approach for multivariate extreme values (with discussion). In: *J Royal Statistical Soc B* 66 (3), S. 497–546. DOI: 10.1111/j.1467-9868.2004.02050.x.
- Hundecha, Y.; Merz, B. (2012): Exploring the relationship between changes in climate and floods using a model-based analysis. In: *Water Resour. Res.* 48 (4), S. n/a. DOI: 10.1029/2011WR010527.
- Huttenlau, M.; Schneeberger, K.; Winter, B.; Reiss, J.; Stötter J. (2015): Analysis of loss probability relation on community level: a contribution to a comprehensive flood risk assessment. In:
  S. M. Sener, C. A. Brebbia und O. Ozcevik (Hg.): Disaster Management and Human Health Risk IV. Disaster Management 2015. Istanbul, Turkey, 20-22 May 2015, S. 171–182.
- Jacobson, C.R. (2011): Identification and quantification of the hydrological impacts of imperviousness in urban catchments: a review. In: *Journal of environmental management* 92 (6), S. 1438–1448. DOI: 10.1016/j.jenvman.2011.01.018.
- Kaplan, S.; Garrick, B.J. (1981): On The Quantitative Definition of Risk. In: *Risk Anal.* 1 (1), S. 11–27. DOI: 10.1111/j.1539-6924.1981.tb01350.x.
- Katzav, J.; Parker, W.S. (2015): The future of climate modeling. In: *Climatic Change* 132 (4), S. 475–487. DOI: 10.1007/s10584-015-1435-x.
- Kelman, I.; Spence, R. (2004): An overview of flood actions on buildings. In: *Engineering Geology* 73 (3-4), S. 297–309. DOI: 10.1016/j.enggeo.2004.01.010.
- Kleindienst, H. (1996): Erweiterung und Erprobung eines anwendungsorientierten hydrologischen Modells zur Gangliniensimulation in kleinen Wildbacheinzugsgebie. Diplomarbeit.
- Klijn, F.; Kreibich, H.; Moel, H. de; Penning-Rowsell, E. (2015): Adaptive flood risk management planning based on a comprehensive flood risk conceptualisation. In: *Mitigation and adaptation strategies for global change* 20 (6), S. 845–864. DOI: 10.1007/s11027-015-9638-z.
- Kling, H.; Fuchs, M.; Paulin, M. (2012): Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. In: *Journal of Hydrology* 424-425, S. 264–277. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.01.011.



- Köplin, N.; Schädler, B.; Viviroli, D.; Weingartner, R. (2013): The importance of glacier and forest change in hydrological climate-impact studies. In: *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17 (2), S. 619–635. DOI: 10.5194/hess-17-619-2013.
- Kundzewicz, Z.W. (2002): Non-structural Flood Protection and Sustainability. In: *Water International* 27 (1), S. 3–13. DOI: 10.1080/02508060208686972.
- LGBI. Nr. 1/2014: Verordnung der Landesregierung über die Festlegung von überörtlichen Freiflächen zum Schutz vor Hochwasser im Rheintal, vom 08.01.2020. In: *LGBI* (1).
- LGBI. Nr. 22/1997: Gesetz über Naturschutz und Landschaftsentwicklung. In: LGBI (22).
- LGBl. Nr. 9/1977: Verordnung der Landesregierung über die Festlegung von überörtlichen Freiflächen in der Talsohle des Walgaues. In: *LGBl* (9).
- Liston, G.E.; Elder, K. (2006): A Meteorological Distribution System for High-Resolution Terrestrial Modeling (MicroMet). In: *J. Hydrometeor* 7 (2), S. 217–234. DOI: 10.1175/JHM486.1.
- Löschner, L.; Herrnegger, M.; Apperl, B.; Senoner, T.; Seher, W.; Nachtnebel, H.P. (2016): Flood risk, climate change and settlement development. A micro-scale assessment of Austrian municipalities. In: *Reg Environ Change* 42, S. 125. DOI: 10.1007/s10113-016-1009-0.
- Melsen, L.A.; Vos, J.; Boelens, R. (2018): What is the role of the model in socio-hydrology? Discussion of "Prediction in a socio-hydrological world". In: *Hydrol. Sci. J.* 63 (9), S. 1435–1443. DOI: 10.1080/02626667.2018.1499025.
- Merz, B.; Kreibich, H.; Schwarze, R.; Thieken, A. (2010): Assessment of economic flood damage. In: *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 10 (8), S. 1697–1724. DOI: 10.5194/nhess-10-1697-2010.
- Monteith, J.L. (1965): Evaporation and Environment. In: *Symposia of the Society for Experimental Biology* (19), S. 205–234.
- Müller, D.; Leitão, P.J.; Sikor, T. (2013): Comparing the determinants of cropland abandonment in Albania and Romania using boosted regression trees. In: *Agricultural Systems* 117, S. 66–77. DOI: 10.1016/j.agsy.2012.12.010.
- Munich RE (2017): Topics Geo Natural catastrophes 2017. Analyses, assessments, positions.
- Nash, J.E.; Sutcliffe, J.V. (1970): River flow forecasting through conceptual models part I A discussion of principles. In: *J. Hydrol.* 10 (3), S. 282–290. DOI: 10.1016/0022-1694(70)90255-6.
- ÖROK (2009): Szenarien der Raumentwicklung Österreichs 2030. Regionale Herausforderungen & Handlungsstrategien. Wien.
- ÖROK (2010): Kleinräumige Bevölkerungsprognose für Österreich 2010-2030 mit Ausblick bis 2050. Endbericht zur Bevölkerungsprognose.
- ÖROK (2011): ÖROK-Regionalprognosen 2010-2030 Modellrechnung bis 2050. Bevölkerung, Erwerbspersonen und Haushalte in den NUTS3-Regionen und Bezirken Österreichs. Unter Mitarbeit von A. Hanika, J. Kytir, G. Biffl und A. Wisbauer. Wien.
- ÖWAV (2013): Mobiler Hochwasserschutz. Wien (ÖWAV-Arbeitsbehelf, 42).
- Pazúr, R.; Bolliger, J. (2017): Land changes in Slovakia: Past processes and future directions. In: *Applied Geography* 85, S. 163–175. DOI: 10.1016/j.apgeog.2017.05.009.
- Price, B.; Kienast, F.; Seidl, I.; Ginzler, C.; Verburg, P.H.; Bolliger, J. (2015): Future landscapes of Switzerland: Risk areas for urbanisation and land abandonment. In: *Applied Geography* 57, S. 32–41. DOI: 10.1016/j.apgeog.2014.12.009.
- Rogger, M.; Agnoletti, M.; Alaoui, A.; Bathurst, J.C.; Bodner, G.; Borga, M. et al. (2017): Land use change impacts on floods at the catchment scale. Challenges and opportunities for future research. In: *Water resources research* 53 (7), S. 5209–5219. DOI: 10.1002/2017WR020723.
- Sauter, I.; Kienast, F.; Bolliger, J.; Winter, B.; Pazur R. (2019): Changes in demand and supply of ecosystem services under scenarios of future land use in Vorarlberg, Austria. In: *Journal of Mountain Science* 12 (16), S. 2793–2809. DOI: 10.1007/s11629-018-5124-x.
- Schattan, P.; Zappa, M.; Lischke, H.; Bernhard, L.; Thurig, E.; Diekkrüger, B. (2013): An approach for transient consideration of forest change in hydrological impact studies. In: *Climate and Land Surface Changes in Hydrology* 359, S. 311–319.
- Schneeberger, K.; Dobler, C.; Huttenlau, M.; Stötter, J. (2015a): Assessing potential climate change impacts on the seasonality of runoff in an Alpine watershed. In: *Journal of Water and Climate Change* 6 (2), S. 263. DOI: 10.2166/wcc.2014.106.
- Schneeberger, K.; Huttenlau, M.; Stötter, J. (2015b): Probabilistisches Modell zur Analyse des räumlich differenzierten Hochwasserrisikos. In: *HyWa* 59 (5), S. 271–277. DOI: 10.5675/HyWa 2015,5 8.
- Schneeberger, K.; Huttenlau, M.; Winter, B.; Steinberger, T.; Achleitner, S.; Stötter, J. (2019): A Probabilistic Framework for Risk Analysis of Widespread Flood Events. A Proof-of-Concept Study. In: *Risk Anal.* 39 (1), 125-139. DOI: 10.1111/risa.12863.
- Schneeberger, K.; Steinberger, T. (2018): Generation of Spatially Heterogeneous Flood Events in an Alpine Region—Adaptation and Application of a Multivariate Modelling Procedure. In: *Hydrology* 5 (1), S. 5. DOI: 10.3390/hydrology5010005.



- Senfter, S.; Leonhardt, G.; Oberparleiter, C.; Asztalos, J.; Kirnbauer, R.; Schöberl, F.; Schönlaub, H. (2009): Flood Forecasting for the River Inn. In: Eric Veulliet, Stötter Johann und Hannelore Weck-Hannemann (Hg.): Sustainable Natural Hazard Management in Alpine Environments. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 35–67.
- Sivapalan, M.; Savenije, H.H.G.; Blöschl, G. (2012): Socio-hydrology. A new science of people and water. In: *Hydrological Processes* 26 (8), S. 1270–1276. DOI: 10.1002/hyp.8426.
- Smaliychuk, A.; Müller, D.; Prishchepov, A.V.; Levers, C.; Kruhlov, I.; Kuemmerle, T. (2016): Recultivation of abandoned agricultural lands in Ukraine: Patterns and drivers. In: *Global Environmental Change* 38, S. 70–81. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2016.02.009.
- Speich, M.J.R.; Zappa, M.; Scherstjanoi, M.; Lischke, H. (2020): FORests and HYdrology under Climate Change in Switzerland v1.0: a spatially distributed model combining hydrology and forest dynamics. In: *Geosci. Model Dev.* 13 (2), S. 537–564. DOI: 10.5194/gmd-13-537-2020.
- Statistik Austria (2019a): Baupreisindex. Online verfügbar unter https://www.statis-tik.at/web\_de/statistiken/wirtschaft/produktion\_und\_bauwesen/konjunkturdaten/baupreisindex/index.html, zuletzt geprüft am 12.02.2020.
- Statistik Austria (2019b): Bevölkerungsstand und Bevölkerungsveränderung. Online verfügbar unter www.statistik.at.
- Storn, R.; Price, K. (1997): Differential Evolution A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces. In: *Journal of Global Optimization* (11), S. 341–359.
- Strasser, U.; Förster, K.; Formayer, H.; Hofmeister, F.; Marke, T.; Meißl, G. et al. (2019): Storylines of combined future land use and climate scenarios and their hydrological impacts in an Alpine catchment (Brixental/Austria). In: *The Science of the total environment* 657, S. 746–763. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.077.
- Taguas, E.V.; Ayuso, J.L.; Pena, A.; Yuan, Y.; Sanchez, M.C.; Giraldez, J.V.; Pérez, R. (2008): Testing the relationship between instantaneous peak flow and mean daily flow in a Mediterranean Area Southeast Spain. In: *Catena* (75), S. 129–137. DOI: 10.1016/j.catena.2008.04.015.
- Thieken, A.H.; Apel, H.; Merz, B. (2015): Assessing the probability of large-scale flood loss events: a case study for the river Rhine, Germany. In: *J. Flood Risk Manage* (8), S. 247–262. DOI: 10.1111/jfr3.12091.
- Verburg, P.; Lotze-Campen, H.; Popp, A.; Lindner M.; Verkek, H.; Kakkonen, E. et al. (2013): Visions of Land Use Transistion in Europe (VOLANTE). Report documenting the assessment results for the scenarios stored in the database.
- Viglione, A.; Merz, B.; Viet Dung, N.; Parajka, J.; Nester, T.; Blöschl, G. (2016): Attribution of regional flood changes based on scaling fingerprints. In: *Water Resour. Res.* 52 (7), S. 5322–5340. DOI: 10.1002/2016WR019036.
- Virtanen, P.; Gommers, R.; Oliphant, T.E.; Haberland, M.; Reddy, T.; Cournapeau, D. et al. (2019): SciPy 1.0--Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python. Online verfügbar unter http://arxiv.org/pdf/1907.10121v1.
- Vorogushyn, S.; Bates, P.D.; Bruijn, K. de; Castellarin, A.; Kreibich, H.; Priest, S. et al. (2018): Evolutionary leap in large-scale flood risk assessment needed. In: *WIREs Water* 5 (2), 1-7. DOI: 10.1002/wat2.1266.
- Winter, B.; Schneeberger, K.; Dung, N.V.; Huttenlau, M.; Achleitner, S.; Stötter, J. et al. (2019): A continuous modelling approach for design flood estimation on sub-daily time scale. In: *Hydrological Sciences Journal* 88 (11), S. 1–16. DOI: 10.1080/02626667.2019.1593419.
- Winter, B.; Schneeberger, K.; Huttenlau, M.; Stötter, J. (2018): Sources of uncertainty in a probabilistic flood risk model. In: *Nat Hazards* (91), S. 431–446. DOI: 10.1007/s11069-017-3135-5.
- Winter, B.; Schneeberger, K.; Vorogushyn, S. (2020): Event generation for probabilistic flood risk modelling: multi-site peak flow dependence model vs weather generator based approach. In: *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss. DOI:* 10.5194/nhess-2019-340.



Diese Projektbeschreibung wurde von der Fördernehmerin/dem Fördernehmer erstellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität der Inhalte sowie die barrierefreie Gestaltung der Projektbeschreibung, übernimmt der Klima- und Energiefonds keine Haftung.

Die Fördernehmerin/der Fördernehmer erklärt mit Übermittlung der Projektbeschreibung ausdrücklich über die Rechte am bereitgestellten Bildmaterial frei zu verfügen und dem Klima- und Energiefonds das unentgeltliche, nicht exklusive, zeitlich und örtlich unbeschränkte sowie unwiderrufliche Recht einräumen zu können, das Bildmaterial auf jede bekannte und zukünftig bekanntwerdende Verwertungsart zu nutzen. Für den Fall einer Inanspruchnahme des Klima- und Energiefonds durch Dritte, die die Rechtinhaberschaft am Bildmaterial behaupten, verpflichtet sich die Fördernehmerin/der Fördernehmer den Klima- und Energiefonds vollumfänglich schad- und klaglos zu halten.