PS Präventionsstiftung der Kantonalen Gebäudeversicherungen
FP Fondation de prévention des établissements cantonaux d'assurance

Projekt 040 / 11. Ausschreibung

Vergleichsstudie nach den Unwettern 2021

Schlussbericht

Projektziel
Vergleich der Unwetterschäden 2021 mit vorangegangenen Unwettern

Auftragnehmer
- Fachhochschule Graubünden
- alpS GmbH
- Umwelt-Wirtschaft-Consult

Projektbegleitung
- Jean-Nicolas Aebischer, HES-SO
- David Bresch, ETH Zürich
- Markus Feltscher, GVG
- Alain Rossier, VKG
- Markus Imhof, VKF
- Martin Jordi, Präventionsstiftung

Nutzen / ROI
- Optimierung von Prävention, Intervention und Versicherung
- Erkennen von Massnahmen zur Reduzierung der Gebäudeschäden

Präventionsstiftung der Kantonalen Gebäudeversicherungen PS
Bundesgasse 20 3011 Bern www.vkg.ch

Fachhochschule Graubünden
University of Applied Sciences

alpS

Prof. Reimund Schwarze
Europa-Universität Frankfurt (O.)

Vergleichsstudie nach den Unwettern 2021



Urs Flüeler / Keystone

Projektleitung	Prof. Dr. Peter Moser, Fachhochschule Graubünden, peter.moser@fhgr.ch Dr. Klaus Schneeberger, alpS GmbH, Schneeberger@alps-gmbh.com Prof. Dr. Reimund Schwarze, Umwelt-Wirtschaft-Consult, schwarze@europa-uni.de
Weitere Autorinnen und Autoren	Fachhochschule Graubünden: Dr. James Glover, Dr. Adhurim Haxhimusa, Dr. Ives Staudt alpS GmbH: Hanna Krimm, Dr. Paul Schattan, Dr. Benjamin Winter

Chur, Innsbruck, Leipzig, 31.08.2023

Fachhochschule Graubünden
Scola auta spezialisada dal Grischun
Scuola universitaria professionale dei Grigioni
University of Applied Sciences of the Grisons

Bildung und Forschung. graubünden

Inhalt

Zusammenfassung ... 6
1 Einleitung ... 8
1.1 Ausgangslage ... 8
1.2 Auftrag der Präventionsstiftung ... 8
1.3 Vorgehen ... 9
2 Meteorologische und hydrologische Analyse ... 12
2.1 Hintergrund und Ziel ... 12
2.2 Veränderung des Hochwasserrisikos ... 12
2.3 Das Unwetter im Juli 2021 – Sturmtief «Bernd» ... 13
2.3.1 Wetterlage ... 14
2.3.2 Länderübergreifende Einordnung des Niederschlagsereignisses «Bernd» ... 16
2.3.3 Extremwetter- und Abflussereignisse im Kontext des Klimawandels ... 18
2.3.4 Tief «Bernd» - Rückschlüsse für die Schweiz ... 21
2.4 Auswertung der Hochwasserereignisse 2005 bis 2021 ... 21
2.4.1 Methodik der meteorologischen und hydrologischen Auswertung ... 21
2.4.2 Meteorologische und hydrologische Darstellung vergangener Ereignisse ... 22
2.5 Darstellung der Hagelaktivität in der Schweiz 2002-2021 ... 22
2.6 Erkenntnisse ... 26
3 Analyse der Schäden in betroffenen Regionen der Schweiz ... 27
3.1 Ziel und Vorgehen ... 27
3.2 Entwicklung der Schäden durch Hagel und Überschwemmung ... 27
3.3 Betroffenheit und Schaden ... 30
3.3.1 Räumliche Darstellung am Beispiel des Kantons Zürichs ... 32
3.3.2 Einordnung des Hagelunwetters 2021 in den Kantonen Aargau, Luzern und Zürich ... 33
3.3.3 Einordnung des Niederschlags 2021 im Kanton Luzern ... 36
3.4 Analyse der Schadenswahrscheinlichkeiten ... 37
3.4.1 Wirkung von Hagelschutzmassnahmen ... 38
3.4.2 Wirkung von Massnahmen gegen Überschwemmungen ... 39
3.5 Erkenntnisse ... 41
4 Summarische Analyse Ahrtal ... 43
4.1 Ereignisdefinition ... 43
4.2 Lokale und regionale Schadensschätzung ... 44
4.3 Die versicherungswirtschaftliche Bewältigung der Schäden ... 45
4.4 Aufzeigen Katastrophenvorsorge ... 47

4.5 Generelle Erkenntnisse ... 48
5 Summarische Analyse Ostalpenraum ... 51
5.1 Ereignisdefinition ... 51
5.2 Lokale und regionale Schadensschätzung ... 52
5.3 Hagel in Österreich und Süddeutschland im Juni und Juli 2021 ... 53
5.4 Aufzeigen Katastrophenvorsorge ... 54
5.5 Generelle Erkenntnisse ... 56
6 Fallstudien ... 58
6.1 Ziel und Vorgehen ... 58
6.2 Fallstudie Menznau ... 59
6.2.1 Gebietsüberblick ... 59
6.2.2 Schutzmassnahmen ... 60
6.2.3 Erfahrungen und Lehren aus den Unwettern 2021 ... 62
6.2.4 Ergebnisse der Simulationen ... 63
6.3 Fallstudie Valley ... 70
6.3.1 Gebietsüberblick ... 70
6.3.2 Schutzmassnahmen ... 71
6.3.3 Erfahrungen und Lehren aus den Unwettern 2021 ... 71
6.3.4 Ergebnisse der Simulationen ... 73
6.4 Erkenntnisse aus den beiden Fallstudien ... 80
7 Synthese ... 81
7.1 Ziel und Vorgehen ... 81
7.2 Erkenntnisse ... 82
7.3 Empfehlungen ... 85
7.3.1 Ausbau der Unwetterdiagnosen ... 85
7.3.2 Optimierung bei Prävention, Intervention und Versicherung ... 86
7.3.3 Ausbau der Schutzstrategien gegen Starkregen und Hagel ... 87
8 Anhang ... 88
8.1 Anhang zu Kapitel 2 ... 88
8.2 Anhang zu Kapitel 3 ... 91
8.2.1 Datenaufbereitung und Datenanforderungen ... 91
8.2.2 Detaillierte Ergebnisse zur Betroffenheit durch Niederschlag 2005 und 2021 im Kanton Luzern ... 92
8.2.3 Ergebnisse der Logit-Regressionen ... 93
8.2.4 Berechnung der Schadenswahrscheinlichkeiten für verschiedene Niederschlagsereignisse ... 97
9 Literaturverzeichnis ... 99

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Analysekonzept 9
Abbildung 2: Übersicht über die Arbeitspakete (AP) 10
Abbildung 3: Schematische Darstellung der Veränderung des Hochwasserrisikos. 13
Abbildung 4: Schematische Darstellung der meteorologischen Situation vom 14.07.2021. 14
Abbildung 5: Gemessene 24-Stunden-Niederschlagssummen am 14.07.2021 15
Abbildung 6: Beispiel Bemessungsniederschlag «Intensity-Duration-Functions» für Innsbruck. 17
Abbildung 7: Niederschlagsintensität (links) und korrespondierende Jährlichkeit (rechts) für das Sturmtief «Bernd» vom 12.-15.07.2021 (72 Stunden) für die Schweiz, Österreich und Deutschland 18
Abbildung 8: Schemaskizze der Veränderung extremer Temperaturen 19
Abbildung 9: Projizierte Änderungen der Intensität und Häufigkeit extremer Niederschläge über Land 20
Abbildung 10: Vergleich der 72-Stunden-Niederschlagsintensität 23
Abbildung 11: Maximale zu erwartende Hagelkorngrössen in der Schweiz 25
Abbildung 12: Hagelklimatologie der Schweiz 26
Abbildung 13: Entwicklung der Überschwemmungs- und Hagelschäden in allen KGV-Kantonen, 2005-2021 28
Abbildung 14: Entwicklung der Hagelschäden in den Kantonen Zürich, Luzern, Aargau, Freiburg und Zug, 2005-2021 29
Abbildung 15: Entwicklung der Überschwemmungsschäden in den Kantonen Zürich, Luzern, Aargau, Freiburg und Zug, 2005-2021 30
Abbildung 16: Hagelereignisse im Kanton Zürich 2021 und 2012 32
Abbildung 17 Rückgang der Schadenswahrscheinlichkeiten bei Hagel durch Massnahmen 39
Abbildung 18: Lage der Orte im Ahrtal 43
Abbildung 19: Ansammlung von Treibgut (Verklausung) bei einer zerstörten Brücke im Ahrtal 45
Abbildung 20: Versicherungsdichten mit sogenannten Altprodukten der ehemaligen Deutschen Versicherungs-AG.. 46
Abbildung 21: Von «Bernd» betroffene Gebiete in Oberbayern, Salzburg und Tirol. 51
Abbildung 22: Hagelereignisse in Österreich und Süddeutschland vor und nach dem Unwetter "Bernd" 2021 54
Abbildung 23: Menznau: Einzugsgebiete der Gewässer 59
Abbildung 24: Menznau: Gefahrenkarte Wasser 60
Abbildung 25a/b: Beispiele von Flächenschutzmassnahmen: Rückhaltebecken Rickenbach (links), Geschiebesammler am Rüdelgraben (rechts) 61
Abbildung 26a/b: Objektschutzmassnahmen entlang der Seewag 61
Abbildung 27: Abflussganglinie Rüdelbach 64
Abbildung 28: Abflussganglinie Rickenbach 64
Abbildung 29a/b: Wassertiefen in den überfluteten Bereichen eines Beispielausschnitts in Menznau für die Szenarien mit T=100 Jahren (links) und T=100 Jahren ohne HRB Rickenbach (rechts) 65
Abbildung 30: Wassertiefen in den überfluteten Bereichen eines Beispielausschnitts Menznau für das Szenario mit T=100 Jahren inklusive 15 % Klimazuschlag. 66
Abbildung 31: Anzahl Gebäude je Wassertiefen-Klasse in Menznau 67
Abbildung 32: Maximale Wassertiefe der Gebäude bei T30-D60 in Menznau 68
Abbildung 33: Maximale Wassertiefe der Gebäude bei T100-D60 plus 15 % in Menznau 68
Abbildung 34: Gemeinde Valley – Einzugsgebiet des Darchinger Dorfbachs und Hochwasserrückhaltebecken in Planung 70
Abbildung 35 a/b: Überschwemmungen in Oberdarching am 26. Juli 2021/ Notdürftiger Schutz mit Dämmen aus Stallmist 71
Abbildung 36 a/b: Verkehrsbehinderung durch Hagel auf der BAB 8 / Strassensperrungen in Oberwarngau durch Muren 72

Abbildung 37 a/b: Ausbau des Hochwasserrückhaltebeckens am Kaltenbach / Schutzmaterialbauten in Oberdarching 72
Abbildung 38: Abflussganglinien im Pilotgebiet Valley am Kontrollquerschnitt K3 (unterhalb der BAB 8) 74
Abbildung 39: Wassertiefen in Valley für die Szenarien T=30 Jahren (links) und T=30 Jahren mit Erweiterung des HRB Kaltenbach (rechts) 75
Abbildung 40: Wassertiefen in Valley für T=100 Jahren (links) und T=100 Jahren mit Erweiterung des HRB Kaltenbach (rechts) 75
Abbildung 41a/b: Wassertiefen in den überfluteten Bereichen und Wasserstände an Gebäuden 76
Abbildung 42: Anzahl Gebäude je Wassertiefen-Klasse in Valley 77
Abbildung 43 a/d: Infiltrationsraten 01 (gering, z.B. durch Walddegradation), IF03 (= Bemessungsrate), IF05 (hoch) sowie Überlagerungsszenario (mehrfarbig) 78
Abbildung 44: Niederschlagsintensität (links) und korrespondierende Jährlichkeit (rechts) für das Sturmtief «Bernd» vom 12.-15.07.2021 (24 Stunden) für die Schweiz, Österreich und Deutschland 88
Abbildung 45: Niederschlagsintensität (links) und korrespondierende Jährlichkeit (rechts) für das Sturmtief «Bernd» vom 16.-19.07.2021 (24 Stunden) für die Schweiz, Österreich und Deutschland 88
Abbildung 46: Niederschlagsintensität (links) und korrespondierende Jährlichkeit (rechts) für das Sturmtief «Bernd» vom 16.-19.07.2021 (72 Stunden) für die Schweiz, Österreich und Deutschland 89
Abbildung 47: Vergleich der 24 Stunden Niederschlagsintensität 90
Abbildung 48 Rückgang der Schadenswahrscheinlichkeiten bei Gebäuden ab Baujahr 2012 94

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Meteorologische Grundlagendaten. 16
Tabelle 2: Hagelskala nach TORRO 24
Tabelle 3: Ausgewählte Unwetter für den Vergleich mit dem Unwetter 2021 31
Tabelle 4: Analyse der Hagel ausgesetzten Objekte im Kanton Luzern 34
Tabelle 5: Analyse der Hagel ausgesetzten Objekte im Kanton Zürich 35
Tabelle 6: Analyse der Hagel ausgesetzten Objekte im Kanton Aargau 36
Tabelle 7: Analyse der Niederschlag ausgesetzten Objekte im Kanton Luzern 37
Tabelle 8: Massnahmen und Schadenswahrscheinlichkeiten durch Überschwemmung im Kanton Luzern 40
Tabelle 9: Risikotransfersysteme in der Schweiz, Deutschland und Österreich. 52
Tabelle 10: Wichtige Flächenschutzmassnahmen der Gemeinde Menznau 60
Tabelle 11: Anzahl der betroffenen Gebäude in der Gemeinde Menznau (Maximalwerte) 67
Tabelle 12: Anzahl der betroffenen Gebäude in der Gemeinde Valley (Maximalwerte) 77
Tabelle 13: Anzahl der potenziell nur gering betroffenen Gebäude für unterschiedliche Wassertiefen für die simulierten Szenarien 77
Tabelle 14: Anzahl Gebäude je Wassertiefen-Klasse (Maximalwerte) in Valley bei Versickerungsstrategien 79
Tabelle 15: Betroffenheit und Schäden durch Niederschlag 2021 im Kanton Luzern 92
Tabelle 16: Betroffenheit und Schäden durch Niederschlag 2005 im Kanton Luzern 93
Tabelle 17: Regressionsresultate für Hagelschäden für die Kantone Zürich und Aargau 94
Tabelle 18: Regressionsresultate für Hagel für die Kantone Zürich: Vergleich Crowd- und Meshs-Daten 95
Tabelle 19: Objekte mit Objektschutzmassnahmen gegen Überschwemmung und Schadensbetroffenheit 95
Tabelle 20: Regressionsresultate für Niederschlag in den Kantonen Zürich, Luzern und Aargau 96
Tabelle 21: Massnahmen und Schadenswahrscheinlichkeiten durch Überschwemmung, Kanton Zürich 97
Tabelle 22: Massnahmen und Schadenswahrscheinlichkeiten durch Überschwemmung, Kanton Aargau 98

Zusammenfassung

In der Studie wird untersucht, ob die Unwetter 2021 in der Schweiz zu weniger starken Schäden geführt haben als ähnliche Unwetter in der Vergangenheit in der Schweiz und als die Unwetter 2021 in Deutschland und Österreich und welches die Ursachen für allfällige Unterschiede sind. Die Analysen berücksichtigen den Einfluss der Prävention, der Intervention (Krisenmanagement) und der Schadensregulierung. Das entspricht den drei Kernaufgaben der kantonalen Gebäudeversicherungen.

Die Beantwortung der Fragestellungen erfolgt in sechs Arbeitspaketen. Im ersten Schritt werden die meteorologischen und hydrologischen Aspekte der vergangenen Hochwasserereignisse untersucht. Die Analysen zeigen, dass in der Schweiz das Ereignis im Juli 2021 im Vergleich mit dem Augustereignis 2005 deutlich schwächer war. Zwar sind 2021 für fast die gesamte Schweiz 72-Stunden-Niederschläge über 50 mm beobachtet worden, jedoch war 2005 ein wesentlich grösserer Bereich - vom Berner Oberland über die Zentralschweiz bis nach Nordbünden - von extremen Niederschlägen mit mehr als 75 mm betroffen. Entsprechend höher waren auch die Jährlichkeiten der Niederschlagsfelder für das Ereignis 2005. Die Analyse der Abflussjährlichkeiten der Pegelstationen unterstützt dieses Bild.

Vergleicht man die Auswirkungen des Sturmtiefs «Bernd» länderübergreifend, zeigt sich, dass die maximalen Niederschlagssummen in Teilen der Schweiz höher lagen als in Deutschland oder Österreich. Klassifiziert man die Daten jedoch mit den jeweils zugrundeliegenden lokalen Bemessungsniederschlägen, erkennt man, dass die gemessenen Niederschlagssummen in Deutschland deutlich seltener vorkommen. Entsprechend wurden für grössere Gebiete Deutschlands Niederschlagsjährlichkeiten grösser als 100 Jahre registriert, während die Daten in der Schweiz eher Niederschlagsjährlichkeiten zwischen 2 und 30 Jahren entsprechen. Gemessen in Wiederkehrintervallen war das Unwetter 2021 in der Schweiz folglich weniger stark als in Deutschland. Österreich war sowohl bezüglich absoluter Niederschlagsmengen als auch bezüglich Jährlichkeiten weniger betroffen als Deutschland und auch als die Schweiz.

In einem zweiten Schritt werden die durch die Unwetter 2021 in der Schweiz verursachten Gebäudeschäden im Detail untersucht und mit ähnlichen Ereignissen früherer Jahre verglichen. Die Analyse fokussiert auf Schäden aufgrund von Niederschlag (Überflutung durch das Ausufern von Fliessgewässern und durch Starkregen) und Hagel. Mit einer datenbasierten Analyse wird die Unwetterintensität den Gebäuden zugeordnet und die Wirkung objektbezogener Präventionsmassnahmen analysiert. Die Resultate weisen darauf hin, dass die Unwetterschäden 2021 in den untersuchten Kantonen überwiegend durch Hagel und Starkniederschlag verursacht wurden. Insbesondere im Kanton Luzern waren viele Gebäude einer Hagelkorngrösse von 5 cm und mehr ausgesetzt. Viele dieser Gebäude erlitten hohe Schäden, möglicherweise auch aufgrund des gleichzeitigen Starkniederschlags. Dieser führte auch zu beträchtlichen pluvialen Überschwemmungsschäden durch Oberflächenabfluss. Die ökonometrischen Auswertungen der Daten für ausgewählte Kantone zeigen, dass die von den Gebäudeversicherungen unterstützten Objektschutzmassnahmen gegen Hagel und Überflutungen wirksam sind und die Schadenswahrscheinlichkeit reduzieren. Die Wirkung der Massnahmen nimmt jedoch ab, wenn die Unwetterintensität zunimmt und sie ist kleiner bei kurzzeitigem Starkniederschlag. Die Massnahmen gegen Hagel beispielsweise sind bis zu einer mittleren Hagelkorngrösse (von 3 bis 4 cm) wirksam.

In der Studie werden zusätzlich die Auswirkungen des Sturmtiefs «Bernd» im Ahrtal im nördlichen Rheinland-Pfalz (Deutschland) und im Ostalpenraum (Oberbayern, Salzburg und Tirol) untersucht und Erkenntnisse für die Schweiz abgeleitet. Die teils verheerenden Erfahrungen vom Juli 2021 verdeutlichen, dass alle Komponenten des Leistungsdreiecks der kantonalen Gebäudeversicherer – Prävention, Intervention und Versicherung – im Hinblick auf Starkregen und Sturzfluten wichtig sind, um Schäden minimal zu halten. So können hochwasserangepasste und hochwasserresistente Bauten die Schäden an Gebäuden vermindern. Frühzeitige und effektive Information und Vorsorge sind im Notfall von entscheidender Bedeutung. Und die Erfahrungen beim Wiederaufbau im Ahrtal zeigen das Dilemma der institutionellen Zersplit-

terung von Prävention, Intervention und Versicherung und einem raschen Wiederaufbau sowie dem Anliegen, den Wiederaufbau zu nutzen, um die Region vor zukünftigen Unwetterereignissen besser zu schützen («Build Back Better»). Die Ereignisse in Salzburg und in Tirol (Österreich) führten in beiden Regionen zu einer kritischen Überprüfung der Schutzstrategien. Eine Schlüsselerkenntnis ist, dass Wasserwirtschaft und Raumordnung gemeinsam betrachtet werden müssen, denn Hochwasser braucht «Raum».

In zwei Fallstudien (Menznau im Kanton Luzern, Valley im oberbayerischen Landkreis Miesbach) werden die Analysen vertieft und insbesondere untersucht, welchen Beitrag Alarmierung, Flächenschutzmassnahmen und mobile Schutzmassnahmen zur Schadensreduktion leisten. Aufgrund der Erfahrungen im Jahr 2021 steht der Starkregen im Zentrum der Analyse. Dabei wurden in Gesprächen mit den zuständigen Behörden Erfahrungen und Einschätzungen über Schutzmassnahmen und das Krisenmanagement erhoben. Zudem stützen wir uns auf die Ergebnisse von hydraulischen Simulationen, die von der Firma RIOCOM durchgeführt wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die bestehenden Flächenschutzmassnahmen 2021 in Menznau als effektiv, aber in Valley als unzureichend erwiesen. Die Ergebnisse der beiden Fallstudien legen nahe, dass die bestehenden Präventionsanstrengungen in Hinblick auf Starkregen und das Oberflächenabflussgeschehen überprüft werden sollten. Die in den Fallstudien genutzten Gefahrenanalysen mittels Simulation können dazu einen wichtigen Beitrag leisten, da sie gebäudegenau Überflutungsrisiken aufzeigen. Auch weisen die Simulationen darauf hin, dass Rückhaltebecken nur einen begrenzten Schutz gegen zukünftig mögliche Starkniederschlagsextreme bieten. Versickerungsstrategien, die insbesondere die Art der Landnutzung berücksichtigen, können ein weiteres Element sein, um das Gefährdungspotenzial zu reduzieren. Intensive Hagelzüge zeigen auch die Grenzen von Präventionsmassnahmen und des Krisenmanagements auf. Eine rasche überregionale Unterstützung bei grossen Ereignissen ist dabei unerlässlich.

Im letzten Kapitel sind die wesentlichen Erkenntnisse aus den Untersuchungen zusammengefasst und Empfehlungen formuliert. Generell hat das Zusammenspiel von Prävention, Intervention und Versicherung während des Unwetter 2021 in der Schweiz gut funktioniert, aber die Schutzstrategien gegen Starkregen und Hagel sind systematisch zu überprüfen und wo nötig auszubauen. Die Empfehlungen betreffen drei Bereiche, den Ausbau der Unwetterdiagnose, die Optimierungen bei Prävention, Intervention und Versicherung und den Ausbau der Schutzstrategien gegen Starkregen und Hagel. Dabei kann die in dieser Studie verwendete datenbasierte Analyse einen wichtigen Beitrag auch in der Zukunft leisten, denn sie erlaubt die Wirkung von Präventionsmassnahmen präzise (d.h. gebäudegenau) zu analysieren. Diese datenbasierte Methode stellt einige Anforderungen an die Datenqualität, die es bei den KGV zu verbessern gilt.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

In den Sommermonaten 2021 ereigneten sich in der Schweiz, Deutschland, Österreich und Belgien zahlreiche Unwetter. Die Auswirkungen waren teilweise verheerend. Auslöser war das gleiche Sturmtief «Bernd». Aber es gab auch Niederschlagsextreme kurz vor und nach «Bernd», die das Bild einer länderübergreifenden Unwetterkaskade im Sommer 2021 begründen. Diese Unwetter haben auch in grossen Teilen der Schweiz zu erheblichen Schäden geführt. Die Schäden aufgrund von Überschwemmungen blieben deutlich tiefer als beim Augustereignis von 2005, jedoch waren die Hagelschäden im Jahr 2021 rekordhaft hoch.

Der Schutz vor Naturgefahren wurde nach den Unwetterereignissen von 2005 und 2007 in der ganzen Schweiz verstärkt. Die öffentliche Hand hat viele Flächenschutzmassnahmen realisiert und die Kantonalen Gebäudeversicherungen (KGV) und Hauseigentümer haben eine grosse Zahl von Objektschutzmassnahmen umgesetzt. Es ist zu vermuten, dass ohne diese Massnahmen die Unwetter im Sommer 2021 in der Schweiz noch deutlich höhere Schäden verursacht hätten.

1.2 Auftrag der Präventionsstiftung

Im Nachgang zu den Unwettern 2021 hat die Präventionsstiftung eine Vergleichsstudie nach den Unwettern 2021 ausgeschrieben. Ziel dieser 11. Ausschreibung ist, dass erstens für die Schweiz die Ereignisse im Sommer 2021 mit jenen der letzten 20 Jahren verglichen werden und zweitens ein summarischer Vergleich zwischen den Ereignissen 2021 in den drei Ländern Deutschland, Österreich und der Schweiz vorgenommen wird. Dabei soll untersucht werden, warum die Schweiz in Bezug auf die verursachten Schäden weniger hart getroffen wurde als andere Länder. Dabei ist der Analysebericht «Alternative Finanzierungs- und Versicherungslösungen» der Präventionsstiftung aus dem Jahre 2009 einzubeziehen (Raschky et al. (2009)). In diesem Bericht wird gezeigt, dass die durch die KGV bereitgestellte Pflichtversicherung (mit integrierter Prävention und Intervention) Schäden umfassend, schnell und effizient im Vergleich zu den institutionellen Lösungen in Deutschland und Österreich behebt.

Die Präventionsstiftung hat im Ausschreibungstext die folgenden sechs Thesen formuliert:

1. Die in den letzten Jahren umgesetzten Präventionsmassnahmen im Flächen- und Objektschutz gegen Hochwasser/Überschwemmung haben das Schadenausmass 2021 substanziell vermindert.
2. Die Alarmierung der breiten Bevölkerung und der Einsatzkräfte hat gut funktioniert.
3. Der rechtzeitige und gezielte Einsatz von mobilen Schutzmassnahmen durch die Einsatzkräfte – dank vorgängiger Einsatzübungen – hat etliche Schäden verhindert.
4. Die Objektschutzmassnahmen gegen Hochwasser/Überschwemmung und Hagel haben ihre Wirksamkeit bewiesen.
5. Die Präventionsmassnahmen gegen Hagel blieben aufgrund der ausserordentlichen Heftigkeit (teilweise Hagelkorndurchmesser von deutlich über 4 cm) zum Teil wirkungslos.
6. Das Zusammenspiel von Prävention, Intervention und Versicherung ist eine gute Grundlage, um auch künftige Ereignisse bewältigen und tragen zu können.

Die Präventionsstiftung hat im Mai 2022 das Konsortium bestehend aus der Fachhochschule Graubünden, der alpS GmbH und Umwelt-Wirtschaft-Consult folgenden Auftrag erteilt:

1. Verifizieren der sechs Thesen
2. Einerseits sollen die Flächenschutz-Massnahmen der öffentlichen Hand beurteilt werden. Andererseits soll schwergewichtig der Objektschutz untersucht werden. Weiter soll aufgezeigt werden, ob diese im Vergleich zu den Ereignissen der letzten 20 Jahre geholfen haben, die Schadenlast in der Schweiz zu reduzieren (unterteilt nach Schadenursache).

3. Summarisches Aufzeigen der Vergleichbarkeit oder der Unterschiede der meteorologischen und topografischen Gegebenheiten in den drei Ländern Deutschland, Österreich und Schweiz
4. Einordnen der Ereignisse in einen historischen Kontext
5. Erarbeiten von weiteren Empfehlungen basierend auf den Thesen für die Schweiz

1.3 Vorgehen

In der vorliegenden Studie untersuchen wir, ob die Unwetter 2021 in der Schweiz zu weniger starken Schäden geführt haben als ähnliche Unwetter in der Vergangenheit in der Schweiz und als die Unwetter 2021 in Deutschland und Österreich. In einem zweiten Schritt klären wir, welches die Ursachen für diese Unterschiede sind.

Bei der Analyse lassen wir uns von den in Abbildung 1 dargestellten Zusammenhängen leiten. Die Höhe der Unwetterschäden entsteht aus dem Zusammenspiel von Intensität des Unwetters und der Anzahl betroffener Wertobjekte. Im Fall dieser Untersuchung sind damit die von den Gebäudeversicherungen versicherten Gebäude gemeint. Darunter fallen grundsätzlich alle Gebäude mit Ausnahme von Bauten des Bundes und allfälliger Kleinstbauten. Wirksames Krisenmanagement (oder Intervention), rechtzeitige Prävention und effiziente Schadensregulierung können die Höhe der Schäden reduzieren. In der Literatur (z.B. in der für unsere Analyse wegleitenden Studie zu wiederholten Unwetterereignissen von Kreibich et al. (2022)) wird zwischen Hazard, Exposition und Vulnerabilität unterschieden.

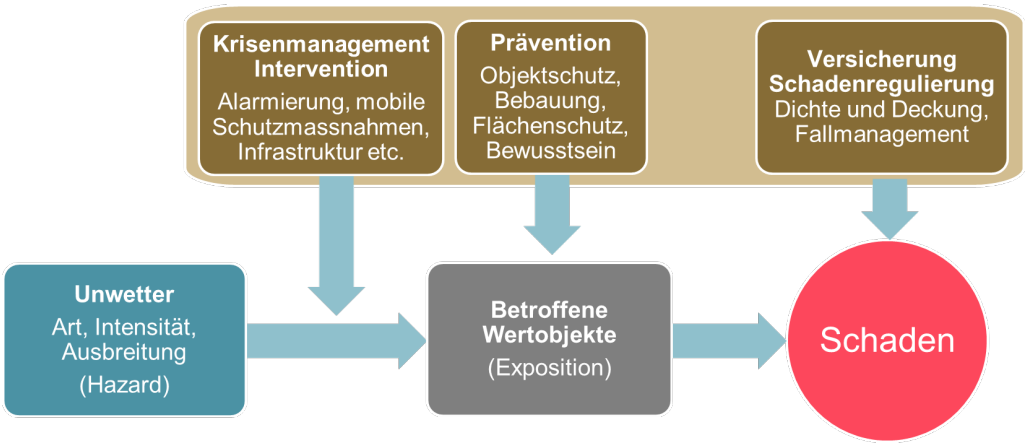


Abbildung 1: Analysekonzept

Bei unseren Analysen berücksichtigen wir den Einfluss der Prävention, der Intervention (Krisenmanagements) und der Schadensregulierung auf die Schadenssumme. Das entspricht den drei Kernaufgaben („Leistungsdreieck“) der kantonalen Gebäudeversicherungen. Wir wollen Erkenntnisse gewinnen, welche Elemente sich bei den Unwettern 2021 als besonders erfolgreich in der Schadensreduktion erwiesen haben und in welchen Bereichen Lücken erkennbar wurden.

Die Beantwortung der Fragestellungen erfolgt in sechs Arbeitspaketen (siehe Abbildung 2). Im ersten Arbeitspaket (Kapitel 2) werden die meteorologischen und hydrologischen Aspekte vergangener Hochwasserereignisse geklärt. Einerseits wird das Sturmtief «Bernd», das Auslöser für die aktuelle Vergleichsstudie ist, länderübergreifend im D-A-CH-Raum analysiert. Anderseits werden vergangene Hochwasserereignisse in der Schweiz bezüglich ihrer Magnitude und flächigen Ausprägung untersucht. Dabei werden die Ereignisse hinsichtlich ihrer räumlich verteilten Niederschlagshöhen und Jährlichkeiten, sowie der Wiederkehrintervalle von Abflüssen eingeordnet.

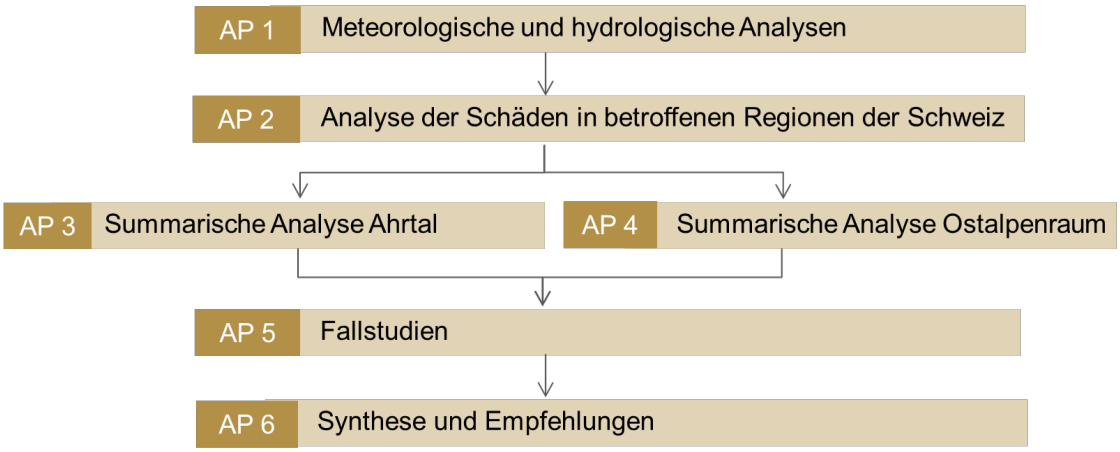


Abbildung 2: Übersicht über die Arbeitspakete (AP)

Im Arbeitspaket 2 (Kapitel 3) werden die durch die Unwetter 2021 in der Schweiz verursachten Gebäudeschäden im Detail untersucht und mit ähnlichen Ereignissen früherer Jahre verglichen. Die Analyse fokussiert auf Schäden aufgrund von Niederschlag durch Regen (Überflutung durch das Ausufern von Fliessgewässern und durch Starkregen) und durch Hagel. Methodisch wird eine Analyse auf der Ebene der einzelnen Gebäude vorgenommen. Wir nutzen die bei den Gebäudeversicherungen vorhandenen detaillierten Daten für jedes versicherte Gebäude. Die Daten zu den Schäden wurden mit den Gebäudedaten verknüpft und anschliessend mit den Unwetterdaten verbunden. Damit wird es möglich, für verschiedene Unwetterereignisse den Zusammenhang zwischen Unwetterintensität (Hazard), Betroffenheit (Exposition) und Schadenshöhe visuell und analytisch gebäudegenau aufzuzeigen. Zudem untersuchen wir, welchen Einfluss die Unwetterintensität und die von den Gebäudeversicherungen mitfinanzierten Objektschutzmassnahmen auf die Schadenswahrscheinlichkeit haben.

In den Arbeitspaketen 3 und 4 (dargestellt in Kapitel 4 und 5) werden die Auswirkungen des Sturmtiefs «Bernd» im Ahrtal im nördlichen Rheinland-Pfalz (Deutschland) und im Ostalpenraum (Oberbayern, Salzburg und Tirol) summarisch untersucht. Mit diesem länderübergreifenden Vergleich von stark betroffenen Regionen ist beabsichtigt, Erkenntnisse bezüglich Prävention und Intervention für die Schweiz zu gewinnen. Diese Analysen basieren auf einer umfassenden Literaturrecherche und auf schriftlichen und mündlichen Befragungen von Experten und Expertinnen. Dabei werden die gesamtwirtschaftlichen und versicherten Schäden aufgezeigt und die Wirksamkeit von Prävention und Intervention eingeschätzt.

Im Arbeitspaket 5 (Kapitel 6) vertiefen wir mittels zweier Fallstudien die Analysen. Insbesondere untersuchen wir, welchen Beitrag Alarmierung, Flächenschutzmassnahmen und mobile Schutzmassnahmen zur Schadensreduktion leisten. In Absprache mit dem Auftraggeber wurden zwei Regionen ausgewählt, Menznau im Kanton Luzern und die Gemeinde Valley im oberbayerischen Landkreis Miesbach. Zur Analyse wurden zwei Methoden eingesetzt. Erstens haben wir aus Gesprächen mit den zuständigen Behörden Erfahrungen und Einschätzungen über Schutzmassnahmen und das Krisenmanagement erhoben. Zweitens stützen wir uns auf die Ergebnisse von hydraulischen Simulationen für diese beiden Regionen. Diese wurden von der Firma RIOCOM mit der Simulationssoftware Visdom durchgeführt. Berücksichtigt werden sowohl pluviale und als auch fluviale Prozesse. Bei den Szenarien-Simulationen werden verschiedene Niederschlagsintensitäten, Infiltrations- und Interzeptionskapazitäten angenommen und damit die Wirkung von Massnahmen zur Hochwasserabwehr untersucht und visualisiert. Das Hauptergebnis sind gebäudegenaue Gefahrenanalysen für beide Regionen. Diese zeigen auf, welchen Wassertiefen die Gebäude bei den verschiedenen Szenarien ausgesetzt sind. Der ausführliche technische Bericht von RIOCOM ist als separater Bericht verfügbar.

Schliesslich fassen wir im Arbeitspaket 6 in Kapitel 7 die wesentlichen Erkenntnisse aus den Untersuchungen zusammen. Dabei steht im Vordergrund, welche Lehren die KGV aus den Ergebnissen dieser

Studie ziehen können. Zentral ist dabei, in welchen Bereichen das Zusammenspiel von Prävention, Intervention und Versicherung gut funktioniert hat und in welchen Bereichen Verbesserungspotenziale bestehen. Wir haben unsere Folgerungen in sieben Erkenntnisse und zehn Empfehlungen zusammengefasst.

2 Meteorologische und hydrologische Analyse

2.1 Hintergrund und Ziel

In Kapitel 2 werden die Ergebnisse der meteorologischen und hydrologischen Auswertungen vergangener Hochwasserereignisse vorgestellt. Zuerst wird das katastrophale Hochwasserereignis im Juli 2021 (Sturmtief «Bernd»), das Auslöser für die aktuelle Vergleichsstudie ist, analysiert. Dazu wird die meteorologische Ausgangssituation und Ausprägung des Ereignisses länderübergreifend im D-A-CH Raum beschrieben und das Sturmtief «Bernd» mit Hinblick auf den Klimawandel eingeordnet.

Der Fokus der Studie liegt auf der Untersuchung der Wirksamkeit von Präventionsmassnahmen. Dazu ist es erforderlich vergangene Hochwasserereignisse in der Schweiz hinsichtlich ihrer Magnitude und flächigen Ausprägung zu analysieren. Die Einordnung beobachteter Ereignisse erfolgt in Bezug auf die meteorologischen Ausgangssituation, insbesondere ihrer räumlich verteilten Niederschlagshöhen und -jährlichkeiten, sowie der Wiederkehrintervalle von Abflüssen. Diese Analysen werden für schadensrelevante Ereignisse für den Zeitraum 2005 bis 2021 vorgenommen. Für die schweizweite Einordnung der Abflussereignisse werden Abflussmessungen an Flusspegeln herangezogen was bedeutet, dass der Fokus auf fluvialen Hochwassern liegt.

Neben Hochwasser weisen auch Hagelereignisse eine hohe Relevanz für die Versicherungsindustrie auf. Daher wird zum verbesserten Verständnis der Hagelaktivität der vergangenen Dekaden die Hagelklimatologie für den Zeitraum 2002 bis 2021 dargestellt. Die Ergebnisse von Arbeitspaket 1 stellen die Grundlage für die weiteren Arbeitsschritte dar.

2.2 Veränderung des Hochwasserrisikos

Die zentrale These der elften Ausschreibung der Präventionsstiftung ist, dass die in den letzten Jahren umgesetzten Präventionsmassnahmen das Schadenausmass 2021 verringert haben. Um diese These stützen oder falsifizieren zu können, ist es notwendig, das Signal der Veränderung der Hochwassergefahr und letztlich auch des Risikos zu verstehen. Dazu ist es erforderlich, ein gemeinsames Verständnis der Veränderung des Hochwasserrisikos zu entwickeln.

Die EU-Hochwasserrichtlinie liefert eine gängige Definition des Hochwasserrisikos als «Kombination der Wahrscheinlichkeit des Eintritts eines Hochwasserereignisses und der hochwasserbedingten potenziell nachteiligen Folgen […]» (Europäische Union 2007, S. 28). Folgerichtig ist für die Bewertung des Hochwasserrisikos die Kenntnis der Hochwassergefahr und deren Folgen, im vorliegenden Fall den monetären Schäden an Gebäuden und Infrastruktur, erforderlich. Diese Elemente unterliegen ihrerseits teilweise erheblichen Veränderungen. Veränderungen der Hochwassergefahr resultieren aus den folgenden drei Teilbereichen (Merz et al. 2012; Hall et al. 2014):

– Atmosphäre (beeinflusst durch den anthropogenen Klimawandel)
– Einzugsgebiet (beeinflusst durch z. B. die Landnutzung, die Siedlungsentwicklung)
– Flusssysteme (beeinflusst durch flussbauliche Massnahmen)

Ausserdem verändert sich die Werteakkumulation der exponierten Objekte sowie deren Vulnerabilität (z. B. durch Bauweise) im Laufe der Zeit stark. Zum besseren Verständnis des veränderten Hochwasserrisikos zeigt Abbildung 3 eine schematische Darstellung ausgewählter Komponenten der Veränderung, wobei die tatsächlich gemessene Abflusszeitreihe an der Isar die Grundlage für die Veränderung der Hochwassergefahr darstellt (Abbildung 3(1)). Die veränderte Hochwassergefahr, beeinflusst durch das veränderte Klima und die intensivere Landnutzung, spiegelt sich in veränderten Überschwemmungsbereichen wider (Abbildung 3(3-9)). Während die Veränderung des Flusssystems durch das Längenbauwerk repräsentiert ist, wird die veränderte Werteakkumulation durch die Siedlungsentwicklung dargestellt. Das schematisch dargestellte Muster der vergangenen Änderung lässt sich beliebig in die Zukunft weiterdenken.

Eine Herausforderung der Vergleichsstudie ist, die Veränderungen der einzelnen Teilbereiche des Hochwasserrisikos von den Änderungen durch die verbesserte Prävention zu trennen, um anschliessend die Wirksamkeit von Präventionsmassnahmen evaluieren zu können.

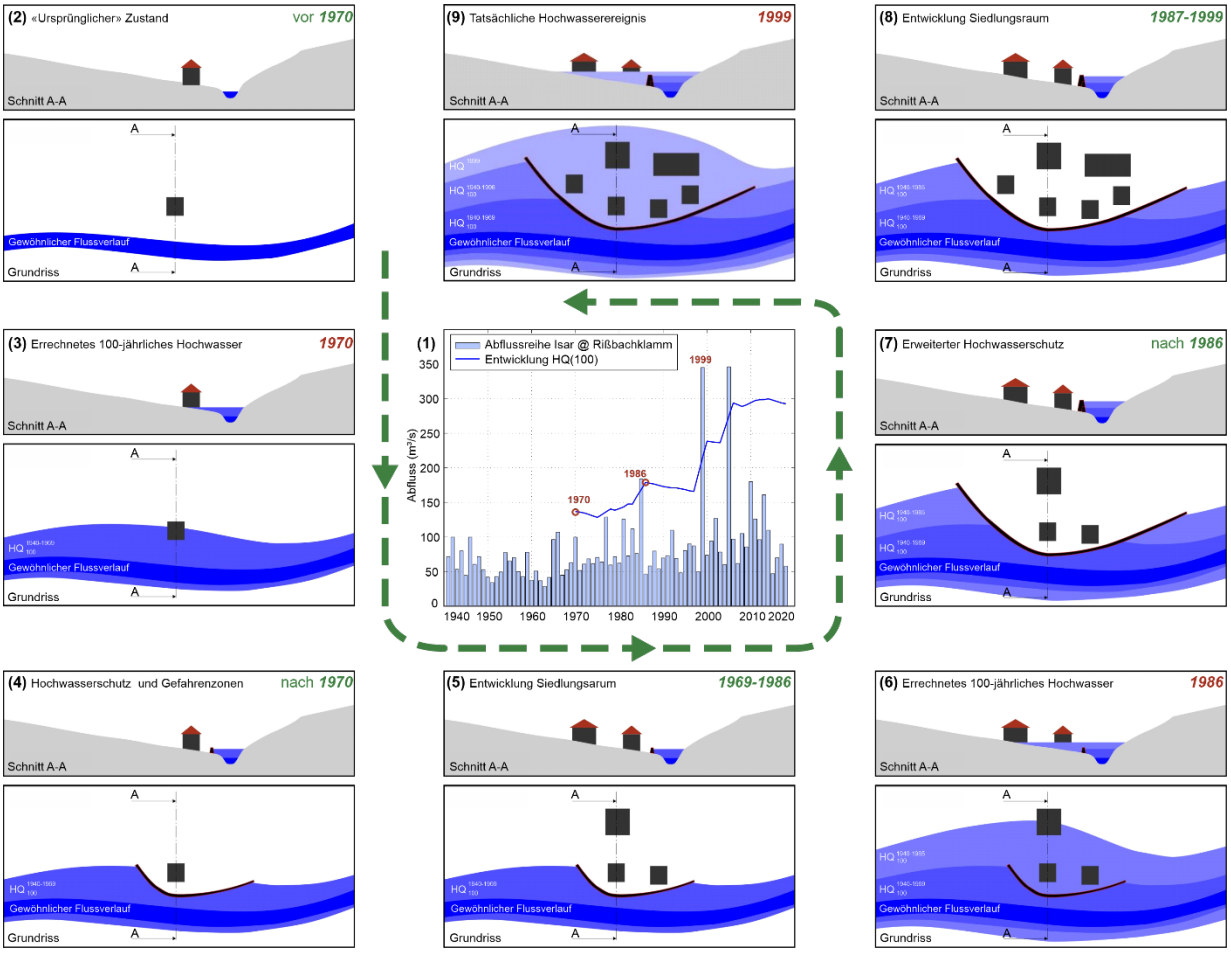


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Veränderung des Hochwasserrisikos.

Erläuterungen: (1) Reale Abflusszeitreihe der Isar am Pegel Rissbachklamm und Darstellung der Entwicklung des 100-jährlichen Hochwasserkennwertes (HQ_{100}) basierend auf einer dreiparametrischen *Allgemeinen Extremwertverteilung* (Anwendung eines gleitenden Mittelwertes zur Veranschaulichung). Die Berechnung des HQ_{100} zu einem bestimmten Zeitpunkt basiert auf dem gesamten davorliegenden Zeitraum. (2)-(9) Darstellung eines fiktiven Siedlungsraumes mittels Grund- und Aufriss: (2) «ursprünglicher» Siedlungs- und Flussraum bis 1969; (3) errechnetes 100-jährliches Hochwasser zum Zeitpunkt 1970 (d. h. basierend auf der Stichprobe 1940-1969) inkl. fiktivem Überschwemmungsbereich; (4) Hochwasserschutz basierend auf den bisherigen Hochwasserkennwerten; (5) Entwicklung des Siedlungsgebietes in den folgenden Jahrzehnten innerhalb und ausserhalb des Hochwasserschutzes; (6) errechnetes 100-jährliches Hochwasser zum Zeitpunkt 1986 (d. h. basierend auf der Stichprobe 1940-1985) inkl. fiktivem Überschwemmungsbereich; (7) erweiterter Hochwasserschutz basierend auf aktuellen Hochwasserkennwerten; (8) Entwicklung des Siedlungsgebietes innerhalb und ausserhalb des erweiterten Hochwasserschutzes; (9) tatsächliche Überschwemmung 1999, die das errechnete 100-jährliche Schutzziel übersteigt. Quelle: eigene Darstellung.

2.3 Das Unwetter im Juli 2021 – Sturmtief «Bernd»

Das Unwetter im Juli 2021 gehört in Bezug auf den monetären Schaden zu den fünf grössten Naturkatastrophen der letzten fünf Jahrzehnte in Europa (Mohr et al. 2023). Am stärksten betroffen war der Westen Deutschlands und die angrenzenden Regionen, wobei die in Deutschland aufgetretenen Niederschlagsmengen zu den fünf grössten der vergangenen 70 Jahren gehören (Ludwig et al. 2022). Die Wetterlage im Juli 2021 war geprägt vom Bodentiefdruckgebiet «Bernd», das für das Wetter in unterschiedlichen Teilen

Mitteleuropas im Zeitraum vom 12. bis zum 19. Juli 2021 verantwortlich war. Zusätzlich kam es in den Monaten Juni und Juli 2021 zu schweren Hagelereignissen, die besonders die Schweiz und Österreich betrafen.

2.3.1 Wetterlage

Das Tief «Bernd» trat als Teil der Grosswetterlage «Tief Mitteleuropa» auf, deren Auswirkungen zeitlich und räumlich weiter ausgedehnt waren. Seit dem 12.07. kam es in Norditalien, Österreich, Süd- und Ostdeutschland sowie der Schweiz zu Überflutungen, meist durch konvektiven Niederschlag inklusive Hagel. In Ostfrankreich, den Südniederlanden und Ostgrossbritannien führte Dauerregen zu Überschwemmungen. Im Anschluss an die schweren Niederschläge in Westdeutschland kam es in Österreich sowie Süd- und Ostdeutschland zu weiteren Hochwassern (Junghänel et al. 2021).

Bei der Grosswetterlage «Tief Mitteleuropa» handelt es sich um eine blockierende Wetterlage, deren Höhenströmung in 5500 m Höhe nicht geradlinig von West nach Ost verläuft, sondern stark mäandriert (rosa Pfeil in Abbildung 4). Unter einer derart ausgelenkten Höhenströmung verringert sich die Zuggeschwindigkeit bodennaher Tief- und Hochdruckgebiete erheblich und sie können ihre Wirkungen lokal konzentriert entfalten. In der schematisch dargestellten Situation vom 14.07. 02:00 Ortszeit befindet sich Tief «Bernd» stationär über Süddeutschland (grün markiert in Abbildung 4). Das Hochdruckgebiet über Nordosteuropa (grünes "H") hatte seit drei Wochen für überwiegend wolkenfreien Himmel über der Ostsee gesorgt und so die Wassertemperatur um bis zu 8 °C angehoben (Mohr et al. 2023). Am 14. und 15.07. transportierte Tief «Bernd» die über der Ostsee aber auch über dem Mittelmeer (Kreienkamp et al. 2021) gebildete sehr feuchtwarme Luftmasse (in jeder vertikalen Luftsäule mit 1 m^2 Grundfläche befanden sich, vertikal aufsummiert, mehr als 40 Liter niederschlagsfähiges Wasser) in das spätere Katastrophengebiet.

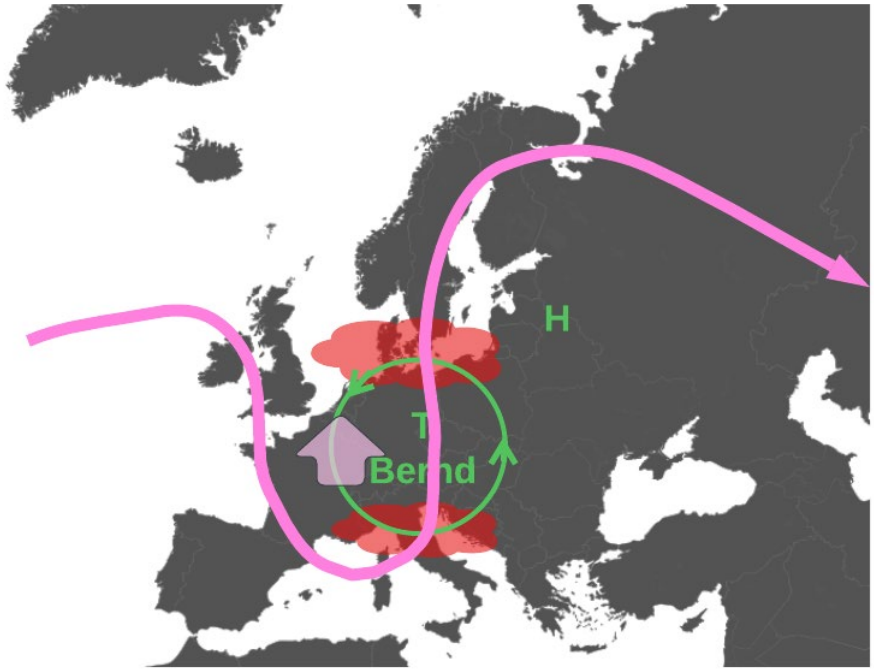


Abbildung 4: Schematische Darstellung der meteorologischen Situation vom 14.07.2021.

Erläuterungen: Rosa Pfeil: Höhenströmung entsprechend der 576 gpdm Isohypse vom 14.07.2021 00 UTC (vgl. ECMWF-Vorhersage in Beiträge zur Berliner Wetterkarte ISSN 0177-3984); Höhentief: transparent-rosa vertikaler Pfeil, Bodendruckverteilung und Bodenzirkulation angedeutet in grün. Entstehungsgebiete feuchtwarmer Luftmassen gekennzeichnet als rote Wolken. Quelle: eigene Darstellung.

In der Höhe hatte sich, ausgelöst durch die induzierte Rotation in der engen Kurve, die die Höhenströmung über Südfrankreich beschreibt, ein Höhentief gebildet (transparent rosa, vertikaler Pfeil). Dieser niedrige Druck in der Höhe sog die feuchtwarme Luft nach oben (dynamische Hebung), kühlte sie dabei ab, und das kondensierende Wasser führte zu flächendeckendem Niederschlag vor allem in Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz, Luxemburg und Belgien. Durch die Freisetzung von Kondensationswärme setzte in weiterer Folge Konvektion ein, die zu zusätzlichen, ergiebigen Schauern führte (Uni Hamburg 2022; Mohr et al. 2023).

Einordnung des Tiefs «Bernd»

Im Zentrum der öffentlichen Wahrnehmung stand das Gebiet der Ahr im nördlichen Rheinland-Pfalz und der umliegenden Flüsse Erft und Maas. Zur besseren Einordnung des Tiefs «Bernd» werden die dortigen Geschehnisse beispielhaft genauer dargestellt und die Begleitumstände analysiert. Die Ahr ist ein Zufluss des Rheins nahe der nordrhein-westfälisch-rheinland-pfälzischen Grenze. Der am 12.07. beginnende Regen steigerte seine Intensität bis zum 14.07. auf einen Tagesniederschlag von 94,5 mm im Flächenmittel über das Flusseinzugsgebiet (Junghänel et al. 2021). Dabei war die Intensität des flächigen Niederschlags räumlich sehr variabel. Zur Hochwasserkatastrophe trugen Verklausungen an Brücken und teilweise stark gesättigte Böden bei. So waren durch vorhergehende Niederschläge die Böden im Südwesten von Nordrhein-Westfalen nur noch bedingt aufnahmefähig (ebd.). Bereits in den Jahren 1804 und 1910 ereigneten sich im Ahrtal verheerende Flutereignisse mit ähnlichen Wasserständen wie 2021 (Roggenkamp und Herget 2022). Dies zeigt klar, dass es sich bei dem Ereignis 2021 – auch in den am stärksten betroffenen Bereichen – um ein sehr seltenes, jedoch nicht einzigartiges Ereignis handelt (Zurich 2022).

Rechtzeitige Vorhersage

Die aussergewöhnliche Wetterlage wurde im Vorfeld genau beobachtet und eine entsprechende Wetterwarnung abgefasst. Abbildung 5 zeigt die beobachteten Niederschlagshöhen des 14.07. und die bereits 48 Stunden im Voraus getätigten Vorhersagen, die die tatsächlich aufgetretenen Niederschläge gut wiedergeben (Mohr et al. 2023). Neben Vorhersagen wie jenen des z. B. Deutschen Wetterdienstes, wurden auch vom European Flood Awareness System bereits am 12.07. und am 13.07. offizielle Hochwassermeldungen an die Behörden der betroffenen Staaten verschickt (Cloke 2021). Im Kapitel 4 wird detailliert auf die Folgen von Tief «Bernd» in Westdeutschland eingegangen.

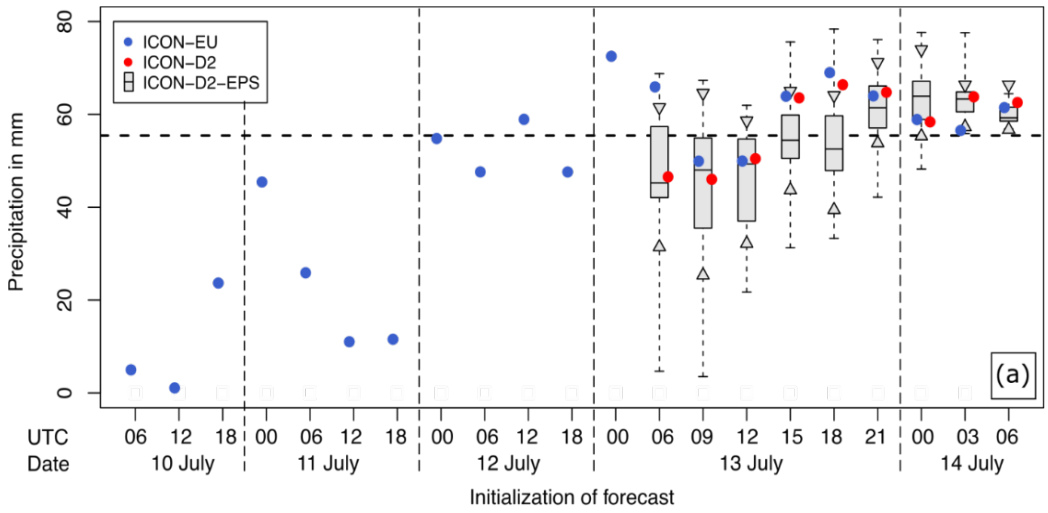


Abbildung 5: Gemessene 24-Stunden-Niederschlagssummen am 14.07.2021

Erläuterungen: gestrichelte horizontale Linie (55,4 mm) sowie Vorhersagen des DWD Ensemble-Vorhersagen (EPS) zu unterschiedlichen Initialisierungszeiten.

2.3.2 Länderübergreifende Einordnung des Niederschlagsereignisses «Bernd»

Einordnung des Niederschlagsereignisses

Obwohl der Niederschlag nur einer von mehreren Faktoren bei der Genese von Hochwasserereignissen ist (vgl. Kap. 2.2), eignet er sich gut für die vergleichende Einordnung von Unwetterereignissen. Jedoch ist zu beachten, dass ein Niederschlagsereignis mit einem bestimmten Wiederkehrintervall (z.B. 100-jährliches Ereignis) nicht zwangsläufig zu Abflussereignissen mit gleichen Wiederkehrintervallen noch zu einem ebensolchen Schaden führt und Niederschlagsereignisse oftmals eine hohe räumliche und zeitliche Variabilität aufweisen. Dies bezieht sich zum einen auf das meteorologische Ereignis selbst und zum anderen auch auf die naturräumlichen Gegebenheiten einer Region. Gebiete, die durch grosse Niederschlagshöhen charakterisiert sind, verkraften in der Regel vergleichsweise hohe Niederschläge gut. Ausserdem weisen sie gewöhnlich ausgeprägte natürliche Gerinnesysteme sowie lokale Abwasser- und Hochwasserschutzsysteme auf. Entsprechend ist die absolute Niederschlagshöhe kein ausreichend guter Indikator um die Betroffenheit einer Region zu beschreiben. Um eine vergleichende Einordnung zwischen Niederschlagsereignissen in verschiedenen geographischen Räumen vornehmen zu können, müssen diese entsprechend der lokalen Niederschlagscharakteristik normiert dargestellt werden. Dabei spielt neben der beobachteten Niederschlagsmenge auch die Niederschlagsdauer eine wesentliche Rolle für das Gefahrenpotential eines Ereignisses.

Datengrundlage und Methodik der Niederschlagsanalyse

Für die Analyse der Niederschlagsereignisse im Rahmen der Vergleichsstudie steht kein homogener, hochauflösender Datensatz für die Schweiz, Deutschland und Österreich zur Verfügung. Entsprechend wurde für jedes Land ein möglichst vergleichbarer Niederschlagsdatensatz für die länderübergreifende Analyse ausgewählt (siehe Tabelle 1). Alle Datensätze haben gemein, dass sie (i) mindestens eine zeitliche Auflösung von einer Stunde besitzen, dass sie (ii) eine räumliche Auflösung von 1x1 km aufweisen und (iii), dass sie auf Basis von Beobachtungsdaten abgeleitet wurden (Wetterradar, Stationsdaten).

Tabelle 1: Meteorologische Grundlagendaten.

Region, Zeitraum, Herausgeber	Niederschlagsdaten	Bemessungsniederschläge
Schweiz 2005 bis 2021 MeteoSchweiz	*CombiPrecip* Komposit-Datensatz (Radar und Stationen), stündlich, 1x1 km, verfügbar seit 2005, Quelle: MeteoSchweiz (o. J.)	Punktinformationen an Stationen (>300 Stationen), Dauerstufen 10 Minuten bis 5 Tage; bis T = 300 Jahre, Interpolation nötig, Quelle: MeteoSchweiz (2022)
Deutschland Juli 2021 DWD	*RADOLAN* Datensatz, Radarbasierte Niederschläge, stündlich, 1x1 km, Quelle: DWD (2022b)	*KOSTRA* Datensatz, 8,5x8,5 km grid, DS 5min bis 3 Tage; bis T = 100 Jahre, Quelle: DWD (2022a)
Österreich Juli 2021 GeoSphere Austria, BMLFUW	*INCA* Datensatz (INCA-L), Re-Analyse-Datensatz (Modell, Radar, Station), stündlich, 1x1 km, Quelle: ZAMG (2022)	*eHYD* Bemessungsniederschlag 2020; Einzelpunkte (Gitter); DS 5 min bis 7 Tage; bis T = 100 Jahre, Quelle: BMLFUW (2022)

Für die Einordnung der Niederschlagsereignisse in Jährlichkeiten wurden die verfügbaren Bemessungsniederschläge für die drei betrachteten Länder aufbereitet. Unter Bemessungsniederschlag versteht man Niederschlagshöhen in mm, die einer gewissen Jährlichkeit zugeordnet werden. Sie ergibt sich im Allgemeinen aus extremwertstatistischen Analysen und wird unter anderem der wasserwirtschaftlichen und

baulichen Planung zugrunde gelegt (Patt und Jüpner 2013). Neben der Überschreitungswahrscheinlichkeit bzw. ihrem Reziprokwert, dem Wiederkehrintervall bzw. der Jährlichkeit (T), wird auch die Dauer bzw. «Dauerstufe» der Niederschlagsereignisse berücksichtigt. Insgesamt ergibt sich entsprechend für jede Dauerstufe eine sogenannte *Intensity-Duration-Function*. Abbildung 6 zeigt beispielhaft den Bemessungsniederschlag mit unterschiedlichen Dauerstufen.

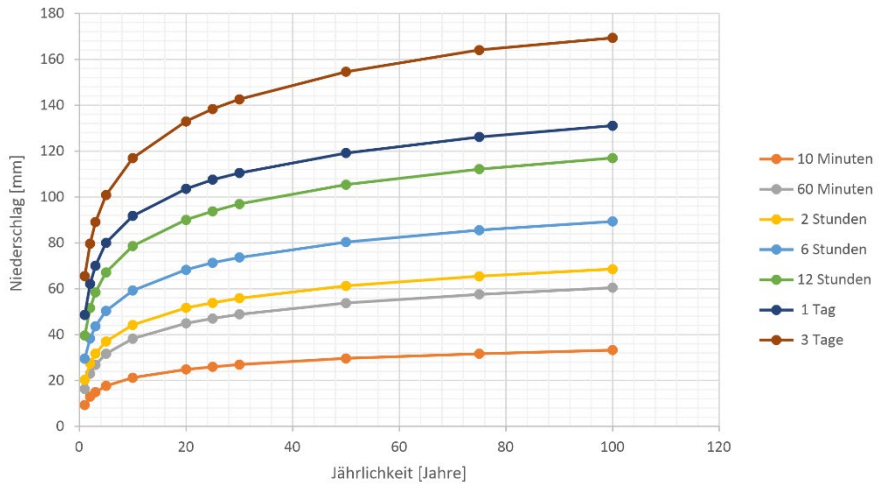


Abbildung 6: Beispiel Bemessungsniederschlag «Intensity-Duration-Functions» für Innsbruck.
Quelle: BMLFUW 2022.

Für Deutschland und Österreich stehen räumlich kontinuierliche Datensätze der Bemessungsniederschläge zur freien Verfügung (KOSTRA bzw. Ehyd-Bemessungsniederschlag). Für die Schweiz stehen ausschliesslich Punktinformationen an ca. 300 Wetterstationen bereit. Entsprechend wurden für die Umsetzung im Projekt die extremwertstatistischen Analysen der Schweiz mittels ordinärem Kriging auf ein kontinuierliches Raster der Gesamtschweiz interpoliert.

Es wurden jeweils zwei Auswertungen für jedes Niederschlagsereignis vorgenommen. Erstens wurden die maximalen Niederschlagssummen (mm) für verschiedene Dauerstufen innerhalb der bestimmten Ereigniszeiträume (3-4 Tagesfenster) berechnet. Die Auswahl der Dauerstufen basiert auf der gemeinsamen Datenverfügbarkeit aller drei Länder (1, 6, 12, 24 und 72 Stunden). Zweitens wurde eine Klassifizierung der Niederschlagssummen über die Jährlichkeit anhand der Bemessungsniederschläge entsprechend der BAFU-Gefahrenstufen für Hochwasser vorgenommen (BAFU 2022a):

T ≤ 2 Jahre, Gefahrenstufe 1:	keine oder geringe Gefahr
2 < T ≤ 10 Jahre, Gefahrenstufe 2:	mässige Gefahr
10 < T ≤ 30 Jahre, Gefahrenstufe 3:	erhebliche Gefahr
30 < T ≤ 100 Jahre, Gefahrenstufe 4:	grosse Gefahr
T > 100 Jahre, Gefahrenstufe 5:	sehr grosse Gefahr

Ergebnisse der Niederschlagsanalyse

In Abbildung 7 ist das Ergebnis des Ländervergleichs für die Niederschlagshöhen und die korrespondierende Jährlichkeit für die Dauerstufe 72 Stunden dargestellt. Im Anhang 8.1 werden in Abbildung 44 die Niederschlagshöhen und die korrespondieren Jährlichkeiten auch für die Dauerstufe 24 Stunden dargestellt.

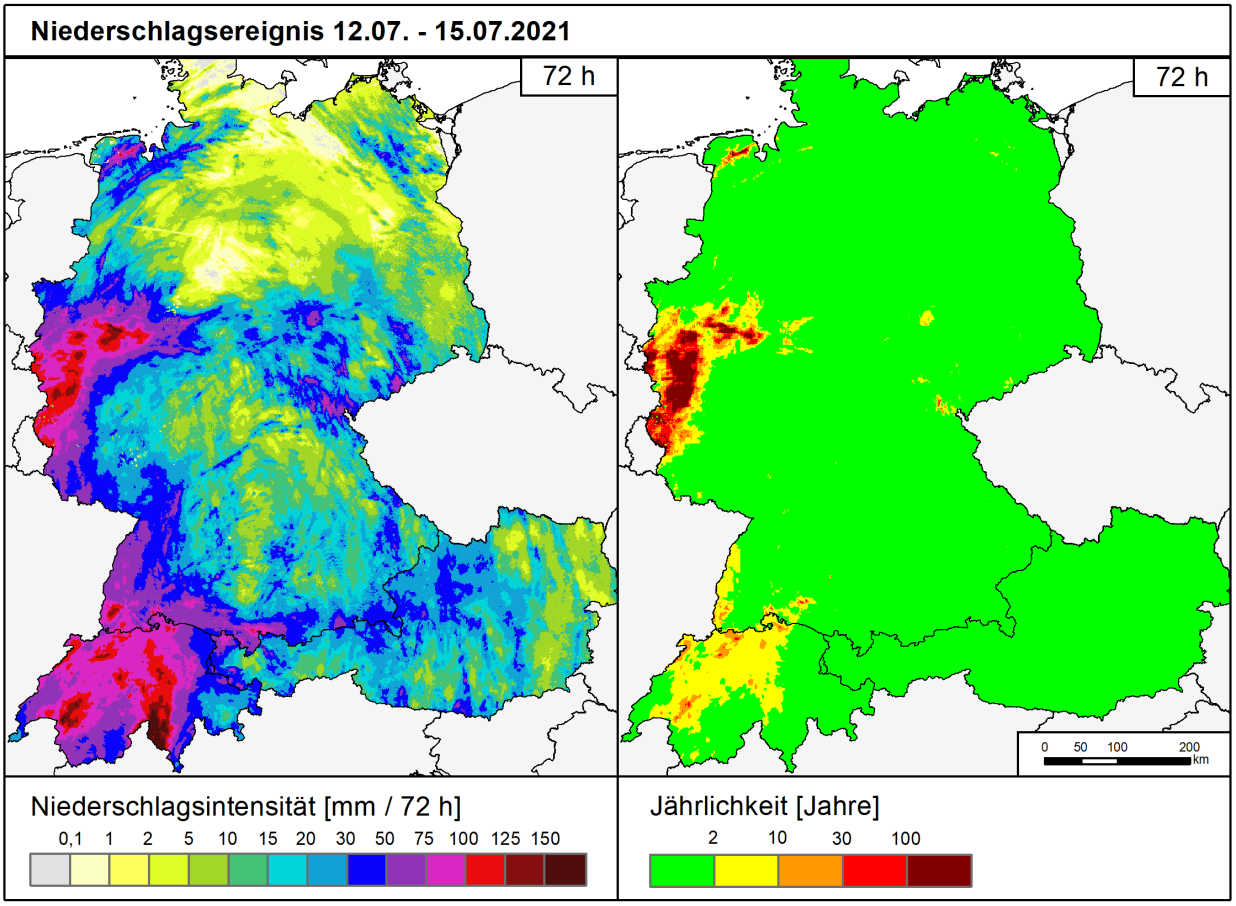


Abbildung 7: Niederschlagsintensität (links) und korrespondierende Jährlichkeit (rechts) für das Sturmtief «Bernd» vom 12.-15.07.2021 (72 Stunden) für die Schweiz, Österreich und Deutschland
Quelle. eigene Darstellung; Datenquellen vgl. Tabelle 1.

Die hier dargestellten maximalen registrierten kumulativen Niederschlagssummen (72 Stunden) liegen in Deutschland bei 182 mm, in der Schweiz bei 245 mm und in Österreich bei 105 mm. Geht man ausschliesslich von den absoluten Niederschlagssummen aus, würde man erwarten, dass die Folgen des Ereignisses im Jahr 2021 in der Schweiz deutlich grösser sein müssten. Klassifiziert man die Daten jedoch mit den jeweils zugrundeliegenden lokalen Bemessungsniederschlägen erkennt man, dass die Ausmasse der Niederschlagssummen in Deutschland trotz erheblich geringerer absoluter Summen deutlich seltener vorkommen. Entsprechend werden hier für grössere Gebiete Niederschlagsjährlichkeiten grösser 100 Jahre registriert, während die Daten in der Schweiz eher Niederschlagsjährlichkeiten zwischen 2 und 30 Jahren entsprechen.

Wie aus Abbildung 7 hervorgeht wurde Österreich nicht in gleichem Masse wie Deutschland betroffen. Starkniederschläge wurden hier vor allem im Zeitraum von 16. bis 19.07. mit maximalen 72 Stunden Niederschlägen von 258 mm beobachtet (vgl. Anhang, Abbildung 45 und Abbildung 46).

2.3.3 Extremwetter- und Abflussereignisse im Kontext des Klimawandels

Der fortschreitende anthropogene Klimawandel wird Wetterextreme und in der Folge auch von Abflussextreme auf einer globalen Skala aber auch schweizweit verschärfen. Dabei ist Klimawandel als eine Änderung des Klimazustands definiert, die aufgrund von Änderungen des Mittelwerts (Abbildung 8 (a)) und/oder des Schwankungsbereichs (Abbildung 8 (b)) seiner Eigenschaften identifiziert werden kann und

die über einen längeren Zeitraum anhält (IPCC 2021a). Beide Änderungen können zu einer Zunahme der extremen Ereignisse hinsichtlich Anzahl und Intensität beitragen (Abbildung 8(c)).

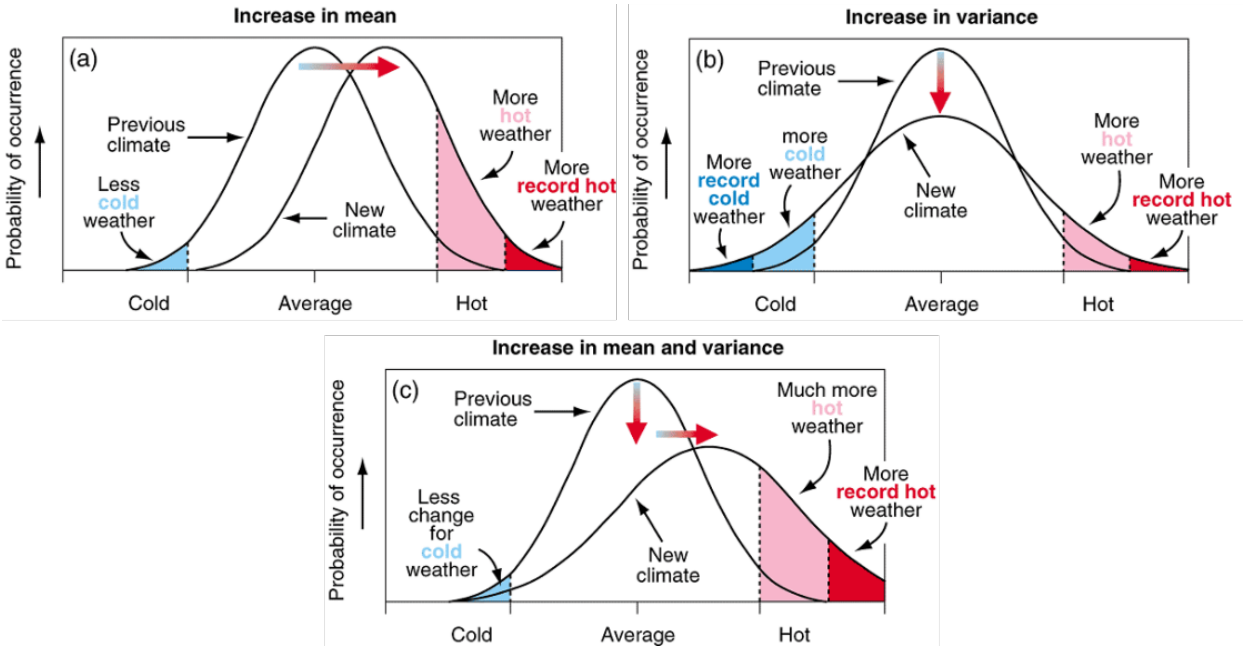


Abbildung 8: Schemaskizze der Veränderung extremer Temperaturen

Erläuterungen: (a) die mittlere Temperatur steigt an, (b) die Varianz verändert sich und (c) der Mittelwert und die Varianz verändern sich. Quelle: IPCC 2001, S. 155.

Generell wird für die globalen Landflächen eine Zunahme von Frequenz und Intensität der Starkniederschlagsereignisse erwartet (Abbildung 9) (IPCC 2021). Für die Zunahme der Niederschlagsvarianz in Europa kann neben dem allgemein (global) gültigen Effekt, dass wärmere Luftmassen mehr Wasserdampf aufnehmen können, die veränderte Ausprägung des Jetstream mit einhergehenden Änderungen von Wetter- und Grosswetterlagen genannt werden.

Wasserdampf in der Atmosphäre

Die im Zuge des anthropogenen Klimawandels erwarteten höheren Temperaturen werden lokale konvektive Niederschläge aufgrund geringerer atmosphärischer Stabilität und der erhöhten Wasserhaltekapazität verschärfen. Dabei erhöht sich die atmosphärische Wasserhaltekapazität nach der Beziehung von Clausius-Clapeyron um rund 7% pro Grad Temperaturerhöhung (z. B. Lenderink und van Meijgaard 2010). Die erhöhte spezifische Feuchte und die Zunahme von Aufwindgeschwindigkeiten, die unter zukünftigen Klimabedingungen zu erwarten sind, führen bis zum Ende des Jahrhunderts in ganz Europa zu sieben Mal häufigeren Situationen extremen Niederschlagspotenzials (Kahraman et al. 2021).

Grosswetterlagen

Europa ist eine aufgrund des starken, meridional geneigten Jet-Streams im Luv der grossen Landmasse für blockierende Grosswetterlagen prädestinierte Region (Kautz et al. 2022). Speziell die Grosswetterlage «Tief Mitteleuropa» ist für ihr Unwetterpotential bekannt. So war sie beispielsweise auch für das Elbehochwasser im August 2002, das Hochwasser in Mitteleuropa im Mai 2013 und das Hochwasser in Mitteleuropa im Mai 2016 verantwortlich. Der DWD berichtet von einer Häufigkeitszunahme dieser Grosswetterlage von ca. 9 «Tief Mitteleuropa» pro Jahr im Jahr 1950 zu ca. 12 «Tief Mitteleuropa» pro Jahr im Jahr 2014 und erwartet eine weitere Zunahme auf 14 «Tief Mitteleuropa» pro Jahr bis zum Ende des Jahrhunderts (DWD 2014). Faranda et al. (2022) fanden für die aktuellen blockierenden Wetterlagen ein

persistenteres Verhalten als in der Vergangenheit. Sie machen dafür einen schwächeren Jetstream verantwortlich, der zu stärkerem Mäandrieren neigt (CEDIM 2021).

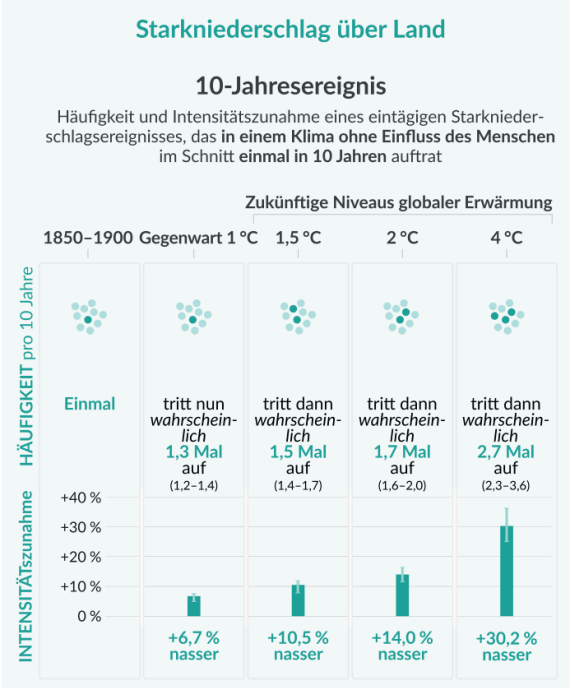


Abbildung 9: Projizierte Änderungen der Intensität und Häufigkeit extremer Niederschläge über Land

Erläuterungen: Extreme Niederschlagsereignisse sind als diejenige tägliche Niederschlagsmenge über Land definiert, die während des Referenzzeitraums 1850–1900 im Durchschnitt einmal in einem Jahrzehnt überschritten wurde.
Quelle: IPCC 2021b, S. 18.

Verändertes saisonales Auftreten von Abflussspitzen

Ein wesentliches Muster, das insbesondere in Gebirgsregionen und deren Vorländern bedeutend ist, ist das veränderte zeitliche Auftreten von Abflussspitzen. Abflussregime weisen oftmals einen deutlichen nivalen oder glazialen (oder Subtypen) Charakter auf. Somit treten Abflussspitzen in alpinen Regionen häufig im Sommerhalbjahr auf, da nur in dieser Periode eine ausreichende Menge an flüssigem Wasser zur Abflussbildung vorhanden ist. Durch veränderte Niederschlagsmuster sowie den Anstieg der Nullgradgrenze und der damit erhöhten Schneegrenze wird sich die Hochwassersaison verändern. Somit können Abflussspitzen und Hochwasserereignisse in Zeiten des Jahres auftreten, die in der Vergangenheit von niedrigen Abflüssen geprägt waren. In der Schweiz kam es in den vergangenen Jahrzehnten bereits zu einer deutlichen Veränderung des Abflussregimes bzw. des zeitliche Auftreten von Abflussspitzen (z. B. Weingartner 2018). Dieses Muster wird sich auch in der Zukunft unter veränderten klimatischen Bedingungen fortsetzen (z. B. Köplin et al. 2014).

Attributionsforschung

Die Methoden der Attributions- oder Zuordnungsforschung, einem Teilbereich der Klimatologie, beantworten die Frage, ob und inwieweit sich Wahrscheinlichkeit und Intensität eines beobachteten Ereignisses durch den Klimawandel verändert haben (van Oldenborgh et al. 2021). Gemeinsam ist allen Methoden, dass Extremereignisse, die dem aktuell beobachteten entsprechen, in unterschiedlichen Klimaten (z. B. aktuelles Klima versus vorindustrielles Klima) gesucht und miteinander verglichen werden.

Den Einfluss des Klimawandels auf Niederschlagsereignisse wie die vom 14. und 15.07. können Kreienkamp et al. (2021) entsprechend der Methode der Attributionsforschung (Philip et al. 2020) für die Grossregion von den Niederlanden bis nördlich der Alpen spezifizieren. Für jeden Ort dieser Region stellt jedes

beobachtete eintägige Niederschlagsereignis ein 400-jährliches Ereignis dar. Ihre Eintrittswahrscheinlichkeit hat sich durch den Klimawandel bereits um einen Faktor zwischen 1,2 und 9 erhöht. Die Niederschlagsintensität hat um etwa 3 % bis 19 % zugenommen. Für das +2 °C-Klimaszenario ist mit einer weiteren Intensivierung um 0,8 % bis 6 % zu rechnen. Die Eintrittswahrscheinlichkeit steigt weiter um einen Faktor von 1,2 bis 1,4.

Faranda et al. (2022) betonen die Rolle der atmosphärischen Zirkulation als Antrieb eines Extremereignisses und identifizieren vergleichbare Situationen daher mittels Mustervergleich des beobachteten Bodendruckfeldes. Für das besagte Niederschlagsereignis finden sie im gegenwärtigen Klima eine grosse und signifikante Niederschlagszunahme (bis zu 5 mm/Tag) über Südwestdeutschland, Ostfrankreich und der Schweiz. Die Persistenz der Wetterlage nimmt zu und ausserdem führt der Klimawandel zu einer stärkeren Konzentration solcher Ereignisse auf den durch konvektives Wetter geprägten Juli.

2.3.4 Tief «Bernd» - Rückschlüsse für die Schweiz

Beobachtete Wetterextreme sowie die durch den Klimawandel erwartete Intensivierung von Extrema haben bereits in der Vergangenheit die globale Risikolandschaft verändert und werden dies in Zukunft weiter tun. Diese Veränderungen treffen auch die Schweiz auf vielfältige Art und Weise. Das Tief «Bernd» bietet den Anstoss zur Überlegung, ob ähnlich katastrophale Wetterextreme, wie sie in Westdeutschland im Juli 2021 beobachtet werden konnten, auch in der Schweiz auftreten könnten.

Die Schweiz war bereits am 12.07.2021 im Vorfeld der Grosswetterlage «Tief Mitteleuropa» in den Einflussbereich feuchter und labiler Luft gelangt, die vor allem im Westen und Süden zu Schauern und Gewittern führte. Die Kaltfront des Bodentiefs «Bernd» überquerte in der Nacht zum 13.07. die Schweiz und intensivierte die Gewittertätigkeit (Mohr et al. 2023). Schwere Sturmböen und konvektiver Starkregen führten zu umgestürzten Bäumen, Erdrutschen, Pass- und Tunnelsperrungen, Schäden an Gebäuden und Fahrzeugen sowie zu höchster oder zweithöchster Hochwasserwarnstufe an einigen Seen (Junghänel et al. 2021). Tagsüber sorgte das Aufgleiten feuchter Warmluft für weitere Niederschläge. Die Schweiz war im Zuge dieser Wetterlage also vor allem von den Auswirkungen der labilen Schichtung und den damit einhergehenden konvektiven Ereignissen, inklusive Superzelle am Abend des 13.07., betroffen.

In der jüngeren Vergangenheit lagen bei Starkniederschlagsereignissen in der Schweiz infolge der Wetterlage «Tief Mitteleuropa» entweder eine allgemeine instabil-gewittrige Situation oder ein in Entstehung befindliches Bodentief vor. Beispiele hierfür sind die Ereignisse in der ersten Junihälfte 2016, Juni 2013 und im August 2002. Inwieweit die Zugbahn eines voll ausgebildeten «Tief Mitteleuropa» determiniert ist und an der Schweiz vorbeiführt, kann nicht abschliessend beantwortet werden. Einzelne Beispiele, wie das Tief «Frederik» (Ereignis Juni 2013), sowie die Tatsache, dass die Grosswetterlage «Tief Mitteleuropa» nur von einer schwach steuernden Höhenströmung geprägt ist, deuten darauf hin, dass auch die Schweiz in das Zentrum eines solchen Ereignisses kommen könnte.

2.4 Auswertung der Hochwasserereignisse 2005 bis 2021

2.4.1 Methodik der meteorologischen und hydrologischen Auswertung

Für die Auswertung der schadensrelevanten Hochwasser der Schweiz im Zeitraum 2005 bis 2021 wurde die oben beschriebene Methode (vgl. Kapitel 2.3.2) angewandt bzw. ergänzt. Als Grundlage für die meteorologische Auswertung wurden in einem ersten Schritt potenziell schadenrelevante Ereignisse identifiziert. Dazu wurden 176 über die gesamte Schweiz verteilte Abflusszeitreihen analysiert. Es wurden Pegelmessstationen ausgewählt, die eine Mindestlänge von mindestens 30 Jahren und keine offensichtliche anthropogene Ausprägung der Hydrographen aufweisen. Den an den Messstationen aufgetretenen Abflussspitzen wurden Jährlichkeiten zugewiesen (Anwendung der *Allgemeinen Extremwertverteilung*) und jene Ereignisse genauer betrachtet, bei denen zumindest an einer Station ein 30-jährlicher Abfluss oder an

mehreren Stationen ein 10-jährlicher Abfluss beobachtete werden konnte. Ein Abfluss- bzw. Hochwasserereignis ist dabei durch das gemeinsame Auftreten von Abflussspitzen in einem bestimmten Zeitfenster charakterisiert. Für die Gesamtschweiz ist ein Zeitfenster mit einer Länge von drei Tagen geeignet, flächig auftretende Hochwasserereignisse festzulegen (Schneeberger et al. 2018). Ein Vergleich mit Schadensdaten hat zu einer Selektion von 18 potenziell relevanten Ereignissen geführt, für die in weiterer Folge die Niederschlagshöhen und -jährlichkeiten analysiert wurden. Diese Niederschlagsjährlichkeiten dienen als Grundlage für die Auswertungen in Kapitel 3.

2.4.2 Meteorologische und hydrologische Darstellung vergangener Ereignisse

Abbildung 10 zeigt die meteorologische und hydrologische Auswertung anhand der Extremwetter- und Abflussereignisse des August 2005 und Juli 2021. In den Abbildungen a) und b) werden die Niederschlagshöhen für eine Dauerstufe von 72 Stunden dargestellt. Die Abbildungen c) und d) zeigen die zugeordneten Niederschlagsjährlichkeiten. Die korrespondierenden Abflussjährlichkeiten an den 176 ausgewählten Pegelstationen werden in den Abbildungen e) und f) dargestellt.

Der Vergleich dieser beiden grossen hydrometeorologischen Ereignisse zeigt klar, dass das Ereignis des Juli 2021 im Vergleich mit dem Augustereignis 2005 eine deutlich schwächere Ausprägung aufwies. Zwar sind 2021 für fast die gesamte Schweiz 72-Stunden-Niederschläge über 50 mm beobachtet worden, jedoch war 2005 ein wesentlich grösserer Bereich vom Berner Oberland über die Zentralschweiz bis nach Nordbünden von extremen Niederschlägen mit mehr als 75 mm betroffen. Entsprechend höher sind auch die Jährlichkeiten der Niederschlagsfelder für das Ereignis 2005 eingeordnet, wobei die Jährlichkeiten für die Dauerstufe 24 Stunden zum Teil noch höher liegen (vgl. Anhang 8.1, Abbildung 47). Die Analyse der Abflussjährlichkeiten zeigt ein ebenso klares Bild. Während 2005 in der Zentralschweiz viele Pegelmessstationen Abflüsse jenseits einer Jährlichkeit von 30 und über 100 Jahren zeigten, wurden 2021 nur an 6 Pegeln Abflüsse über einer Jährlichkeit von 30 Jahren gemessen.

2.5 Darstellung der Hagelaktivität in der Schweiz 2002-2021

Die bisherigen Betrachtungen fokussieren auf Hochwasserereignisse. In weiterer Folge werden Hagelstürme betrachtet, die ähnliche Schadensdimensionen wie Jahrhunderthochwasser erreichen können und für die Versicherungswirtschaft von hoher Relevanz sind. Während die Modellierung von Hochwasser und die damit verbundenen Schäden auf eine lange Forschungstradition zurückblickt, steht die Risikoabschätzung von Hagelereignissen noch relativ am Anfang. Ursache dafür ist unter anderem die hohe räumliche und zeitliche Variabilität dieser oft nur lokalen Ereignisse. Erst durch flächendeckende Wetterradarnetzwerke stehen technische Möglichkeiten zur Verfügung, diese meteorologische Gefahr präziser zu erfassen.

In der Schweiz wurden hier in den letzten Jahren grosse Forschungsfortschritte in Bezug auf Hagelattribution und Darstellung erzielt. Neben dem operationellen Aufbau einer automatischen Hageldetektion aus Wetterradardaten (Betschart und Hering 2012; MeteoSchweiz 2021a) wurden im Rahmen des kürzlich abgeschlossenen Projektes «Hagelklima Schweiz» die vorhandenen Wetterradaraufzeichnungen (2002-2021) mit überarbeiteten Algorithmen nochmals systematisch ausgewertet. Das Ergebnis sind zum einen monatliche Datensätze der «Maximum Expected Severe Hail Size» (MESHS) sowie eine hochauflösende Hagelklimatologie im Sinne der mittleren, jährlichen Anzahl an Hageltagen mit einem Hageldurchmesser grösser 2 cm bzw. 4 cm (MeteoSchweiz 2021a). Grundsätzlich handelt es sich bei diesen Daten um Rohdaten (Schroeer et al. 2021). Laut gängiger Hagelklassifikationsskalen geht man ab einem Hageldurchmesser von ca. 2 cm von ersten und ab ca. 4 cm von schweren strukturellen Hagelschäden aus (vgl. Tabelle 2). Neben der Hagelkorngrösse spielen auch Faktoren wie die Windgeschwindigkeit und die Anzahl der Hagelkörner pro Quadratmeter eine Rolle für die Schadenswirkung. Alle Datensätze liegen mit einer räumlichen Auflösung von 1x1 km für die Gesamtdomain der Schweiz vor.

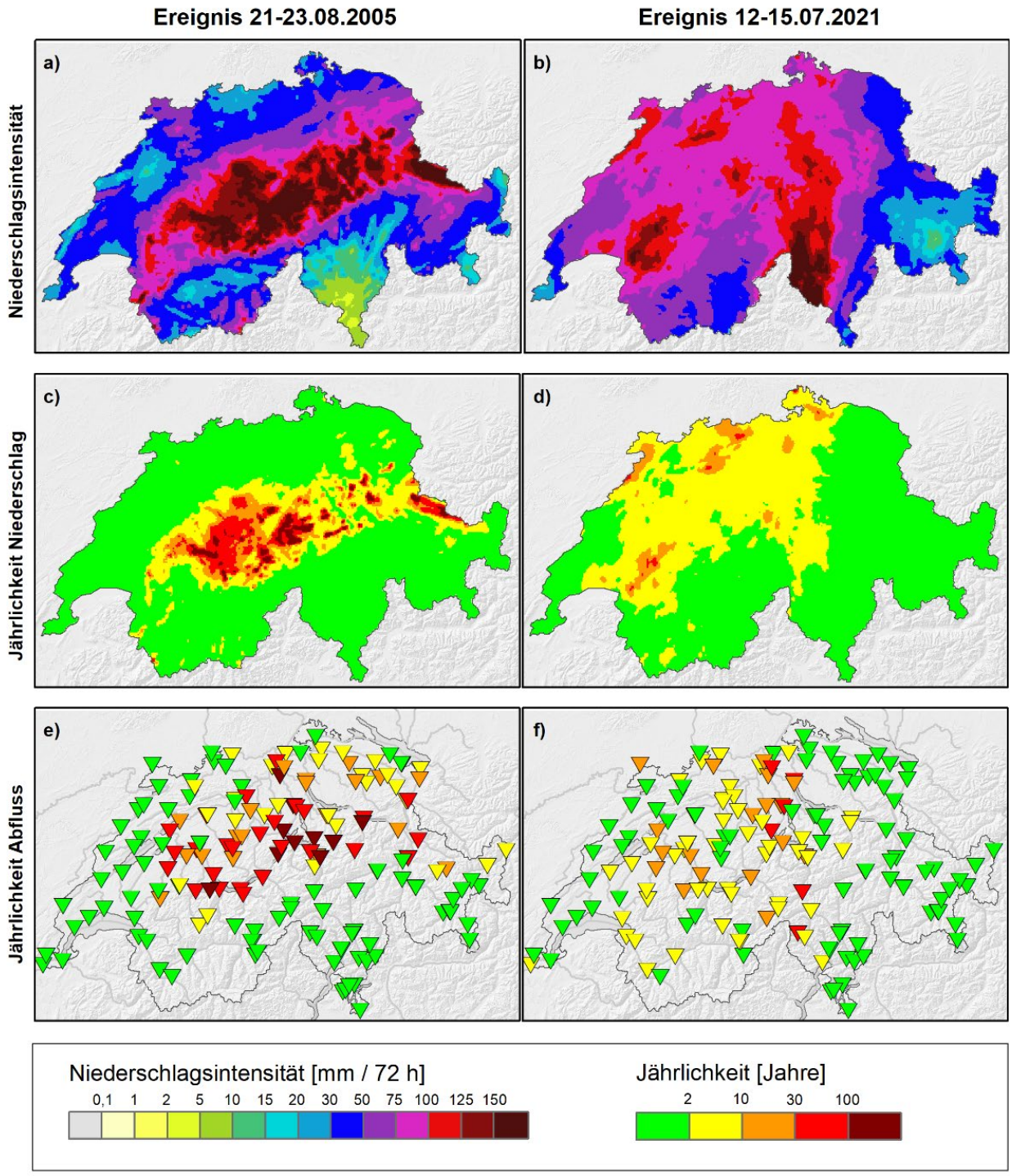


Abbildung 10: Vergleich der 72-Stunden-Niederschlagsintensität

Erläuterungen: (a, b), der korrespondierenden Jährlichkeit des Niederschlags (c, d) und der Jährlichkeit des gemessenen Abflusses an den Pegeln (e, f) für das Ereignis im August 2005 und Juli 2021. Eigene Darstellung; Datenquellen: vgl. Tabelle 1, BAFU 2022b.

Tabelle 2: Hagelskala nach TORRO

TORRO-Skala	Durchmesser (mm)	Grössenvergleich	Kinetische Energie (J)	Wirkungsgrad (-)
H0	< 5	Erbse	< 0,02	Eiskörner
H1	5-15	Haselnuss	0,02-0,2	Schadensspuren
H2	10-20	Kirsche	0,4-0,7	spürbare Schaden
H3	20-30	Aprikosenkern	0,7-3,5	ernste Schäden
H4	25-40	Taubenei	1,7-11,1	schwere Schäden
H5	30-50	Golfball	3,5-27,0	zerstörend
H6	40-60	Hühnerei	11,1-56,0	zerstörend
H7	50-75	Pfirsich	27,0-103,7	vernichtend
H8	60-90	Orange	56,0-250,9	vernichtend
H9	75-100	Grapefruit	> 103,7	aussergewöhnlicher Schadenshagel
H10	> 100	-	> 250,9	extrem aussergewöhnlicher Schadenshagel

Quelle: IGS-Austria 2011.

Eine wichtige Einschränkung bei der Interpretation der Datensätze besteht darin, dass es sich nicht um gemessenen Hagel an der Erdoberfläche handelt, sondern um eine wahrscheinlichkeitsbasierte Klassifikation von Wetterradardaten. Dabei wird die Grösse der aktiven Zone, in welcher Hagelwachstum in Gewitterzellen stattfinden, über die Höhe der Nullgradgrenze aus Modelldaten (COSMO-CH) und der maximalen Höhe von spezifischer Radarechos, dem EchoTop-Signal (mit Grenzwert 45 bzw. 50 dBZ), bestimmt (Nisi et al. 2016; Nisi et al. 2018). Je grösser der Abstand zwischen der Nullgradgrenze und dem EchoTop-Signal, desto grösser ist die Hagelwahrscheinlichkeit und die zu erwartende Hagelkorngrösse. Entsprechend ist der MESHS-Datensatz eine Schätzung der maximalen Grösse eines auf dem Boden auftreffenden Hagelkorns innerhalb der räumlichen 1 x 1 km Auflösung. Im Umkehrschluss sind die meisten Hagelkörner kleiner als die maximale Korngrösse und die Wahrscheinlichkeit ist gering, dass ein Objekt (z. B. Gebäudedach) von dem grösstmöglichen Hagelkorn getroffen wird (Meteo Schweiz 2021b).

Im Rahmen des Arbeitspakets wurden die monatlichen MESHS Datensätze kartographisch für das ausgeprägte Hageljahr 2021 dargestellt (Abbildung 11) und die Gesamtdaten (2002-2021) für die weitere Verschneidung mit Schadensdaten als einzelne Geodatensätze aufbereitet. Die Teilabbildungen der Monate Juni und Juli 2021 zeigen ein über weiter Teil der Schweiz verbreitete sehr hohe Hagelaktivität mit hohen bis sehr hohen Hagelintensitäten, was auf ein erhebliches Schadensausmass hindeutet. In Abbildung 12 ist die mittlere Anzahl an jährlichen Hageltage dargestellt. Bei der Interpretation der Hagelauswertung in Kapitel 3 wird trotz der grossen Unschärfen der MESHS-Datensatz berücksichtigt. Ein Vergleich zu seit kurzem verfügbaren sogenannten Crowd-Daten zeigt, dass der MESHS-Datensatz die beste verfügbare Möglichkeit für eine gebäudegenaue Herleitung der wahrscheinlichen Hagelintensität darstellt (siehe Abschnitt 3.3).

Grundsätzlich spiegeln sich in den aktuellen Auswertungen auch die schon aus früheren Arbeiten bekannten Muster wider (siehe z. B. Meteotest 2020). Das zentrale und östliche Mittelland, der östliche Jura sowie das südliche Tessin gehören zu den am stärksten von Hagel betroffenen Regionen in der Schweiz. Hier ist jährlich mit Hagelkorngrössen über 2 cm zu rechnen bzw. alle 2 bis 4 Jahre mit Hagelkorngrössen über 4 cm. Dem entgegen stehen die selten betroffenen Regionen des Wallis, Graubünden und das Engadin.

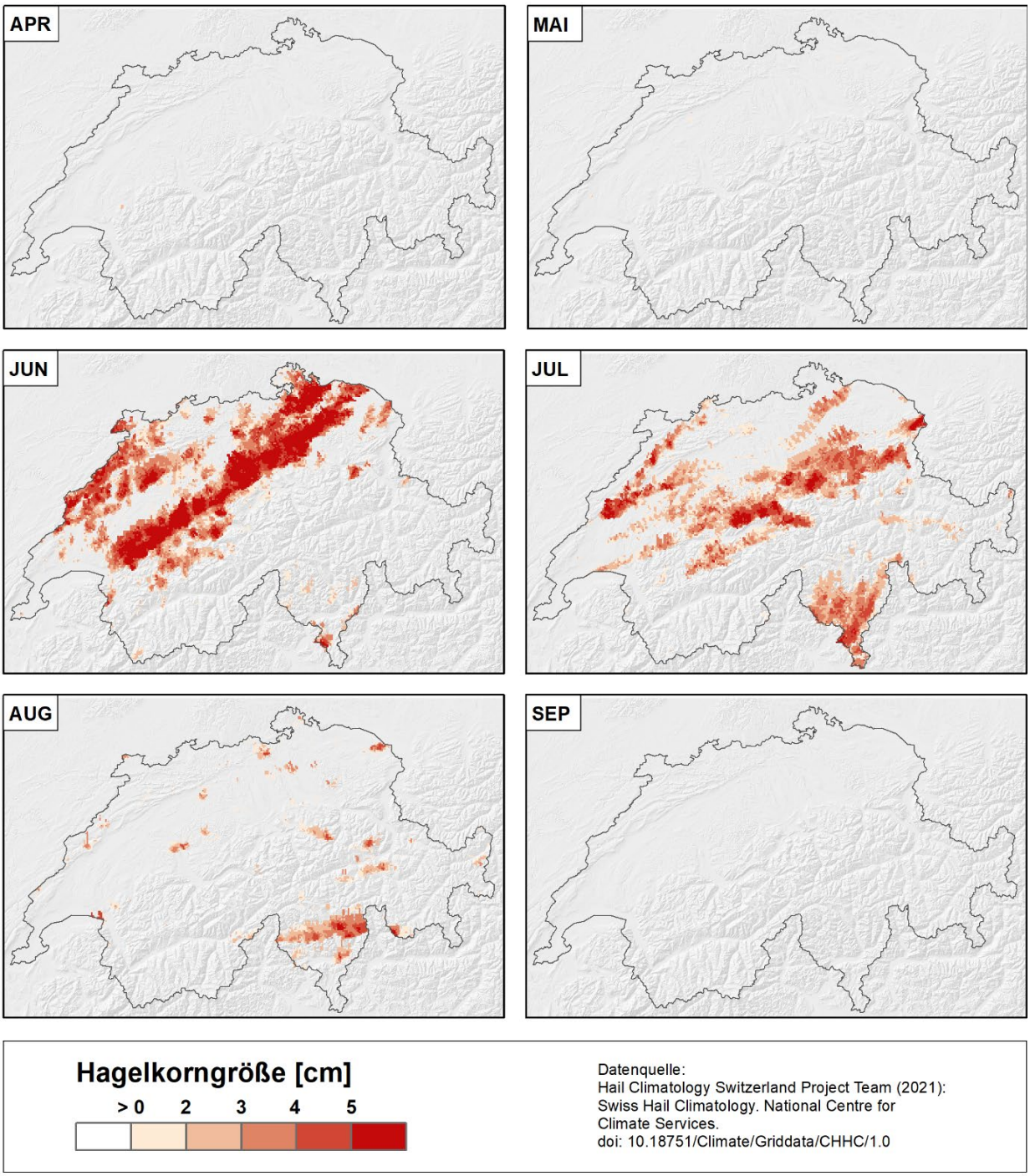


Abbildung 11: Maximale zu erwartende Hagelkorngrössen in der Schweiz

Erläuterungen: Darstellung für die Monate April, Mai, Juni, Juli, August und September 2021. Der Darstellung liegt der Datensatz «Maximum Expected Severe Hail Size» zugrunde. Quelle: eigene Darstellung; Datenquellen: MeteoSchweiz 2021a.

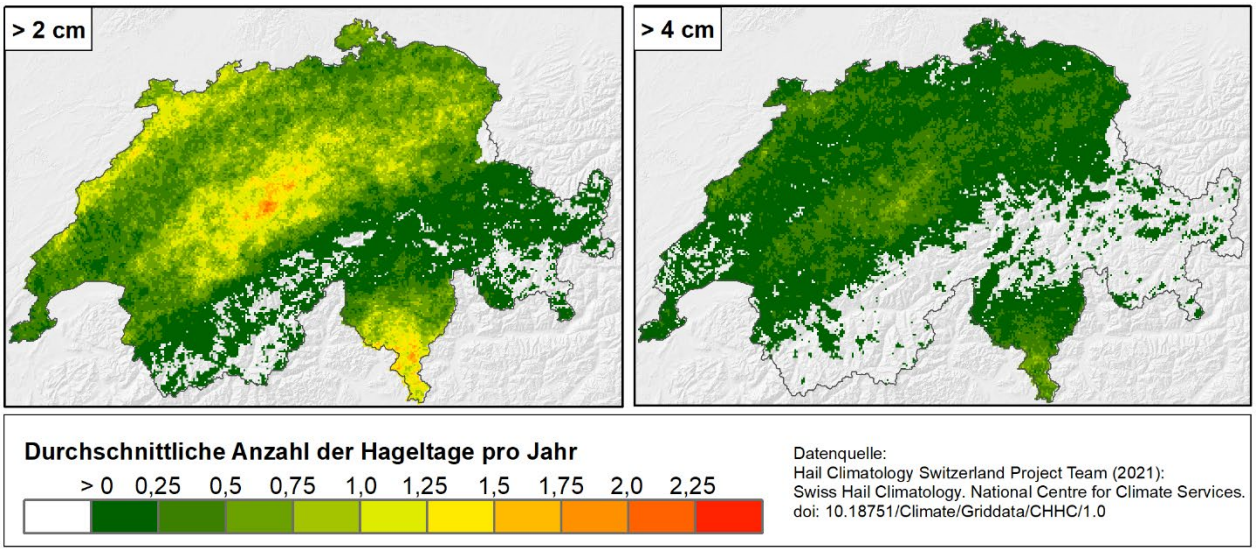


Abbildung 12: Hagelklimatologie der Schweiz

Erläuterungen: Mittlere Anzahl Jährlicher Hageltage (2002-2021) > 2 cm (links) und > 4 cm (rechts). Quelle: eigene Darstellung; Datenquellen: MeteoSchweiz 2021a

2.6 Erkenntnisse

Die wesentlichen Erkenntnisse der meteorologischen und hydrologischen Analysen des Unwetters 2021 und die vergleichende Einordnung dieses Ereignisses lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Das Unwetter im Juli 2021 weist im Vergleich zum Augustereignis 2005 innerhalb der Schweiz eine deutlich geringere Intensität hinsichtlich des grossflächigen Niederschlags- und Abflussgeschehens auf.
- Im länderübergreifenden Vergleich (D-A-CH Raum) sind die grossflächig aufgetretenen Niederschlagsjährlichkeiten während des Unwetter 2021 in Deutschland (besonders in Teilen Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalens) deutlich höher ausgefallen als in der Schweiz und in Österreich.
- Der fortschreitende anthropogene Klimawandel wird in vielen Gebieten weltweit sowie in der Schweiz mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einer Intensivierung von extremen Niederschlägen und Überschwemmungen führen.
- Die schweizweite Auswertung von Niederschlagsfeldern und die monatliche Hagelklimatologie bieten die Grundlagen für die weiteren statistischen Auswertungen in Kapitel 3. Die zugrundeliegenden Datensätze weisen zum Teil Unsicherheiten auf, was bei der Interpretation der weiteren Ergebnisse jedoch berücksichtigt wird.

3 Analyse der Schäden in betroffenen Regionen der Schweiz

3.1 Ziel und Vorgehen

In diesem Kapitel werden die durch die Unwetter 2021 in der Schweiz verursachten Gebäudeschäden im Detail untersucht und mit ähnlichen Ereignissen früherer Jahre verglichen. Die Analyse fokussiert auf Schäden aus Niederschlag (Überflutung durch das Ausufern von Fliessgewässern und durch Starkregen) und Hagel. Das Interesse gilt den folgenden Forschungsfragen:

– Welche Faktoren (meteorologische, hydrologische, Besiedlung etc.) haben das Schadensausmass 2021 beeinflusst?
– Wodurch unterscheiden sich die Schäden des Unwetters 2021 von jenen aus früheren Unwettern? Welche Faktoren sind für die Unterschiede verantwortlich?
– Welchen Einfluss hatten die ergriffenen Objektschutzmassnahmen gegen Hochwasser und Hagel auf die Schäden?

Die Analyse basiert auf dem in Kapitel 1 dargestellten Zusammenhang, wonach die Höhe der Unwetterschäden aus dem Zusammenspiel von Intensität des Unwetters und der Anzahl betroffener Gebäude entsteht. Methodisch wird eine Analyse auf der Ebene der einzelnen Gebäude vorgenommen. Wir nutzen die bei den Gebäudeversicherungen vorhandenen detaillierten Daten für jedes einzelne versicherte Gebäude. Da die kantonalen Gebäudeversicherungen ein Monopol haben, liegen Informationen zu allen Gebäuden eines Kantons vor, also zum Beispiel zu den 306’000 versicherten Gebäuden im Kanton Zürich. Diese grossen Datenmengen stellen hohe Anforderungen an die Datenqualität. Daten zu den Schäden müssen automatisch mit den Gebäudedaten verknüpft werden können und Adressdaten müssen in einem Format vorliegen, welches eine Umwandlung in Koordinaten erlaubt. Erst dann können die Gebäude- und Schadensdaten mit den Unwetterdaten verknüpft werden. Diese Anforderungen haben dazu geführt, dass der Kreis der untersuchten Kantone eingeschränkt werden musste. Im Anhang 8.2.1 sind die Herausforderungen bei der Datenaufbereitung aufgezeigt und Empfehlungen für das zukünftige Datenmanagement festgehalten.

Diese datengetriebene Methode hat den grossen Vorteil, dass eine gebäudegenaue Analyse vorgenommen werden kann. Zudem wird es dadurch möglich, Unwetterereignisse über die ganze Zeitperiode 2005 bis 2021 monatsgenau (Hagel) bzw. tagesperiodengenau (Niederschlag) in die Untersuchung einzubeziehen. Das ist umso wichtiger, als die meteorologische und hydrologische Analyse in Kapitel 2 gezeigt hat, dass das ursprünglich als Vergleich anvisierte Unwetter 2005 sich in verschiedener Hinsicht von den Unwettern 2021 unterscheidet.

Der Aufbau dieses Kapitels ist wie folgt: Zunächst wird eine deskriptive Analyse der Schäden durch Hagel und Überschwemmung für alle KVG-Kantone und für die fünf mit dem Auftraggeber ausgewählten Kantonen Aargau, Freiburg, Luzern, Zug und Zürich vorgenommen. Anschliessend wird in Abschnitt 3.3 für das Unwetter 2021 und vergleichbare Unwetterereignisse der Zusammenhang zwischen Unwetterintensität (Hazard), Betroffenheit (Exposition) und Schadenshöhe visuell und analytisch aufgezeigt. Im Abschnitt 3.4 wird untersucht, welchen Einfluss die Unwetterintensität und die von den Gebäudeversicherungen mitfinanzierten Objektschutzmassnahmen auf die Schadenswahrscheinlichkeit haben. Diese Analyse ist aufgrund der hohen Anforderungen an die Datenqualität zurzeit nur für die Kantone Aargau, Zürich und teilweise für Luzern möglich.

3.2 Entwicklung der Schäden durch Hagel und Überschwemmung

Abbildung 13 gibt einen ersten Überblick über die Entwicklung der Schäden durch Hagel und Überschwemmung (inkl. Hochwasser) in den 18 Kantonen, deren kantonale Gebäudeversicherungen Mitglied bei der Vereinigung Kantonaler Gebäudeversicherungen sind (KGV-Kantone). Basierend auf den vom interkantonalen Rückversicherungsverband (IRV) übermittelten individuellen Schadensdaten von 2005 bis

2021 sind die Anzahl Schadensfälle, die gesamte Schadenssumme und die Höhe des durchschnittlichen Schadens pro Jahr differenziert für Hagel- und Überschwemmungsfälle dargestellt. [1]

Der Vergleich über diesen Zeitraum macht deutlich, dass das Unwetter 2021 in den KGV-Kantonen ausserordentlich grosse Hagelschäden verursacht hat. Zum einen war mit ca. 60'150 Schadensfällen die Zahl etwa doppelt so hoch im Vergleich zu der Anzahl Fälle in den bisherigen Spitzenjahren 2009 und 2011. Zum anderen war die durchschnittliche Schadenshöhe mit etwa 12'000 CHF ebenfalls doppelt so hoch wie 2009 und 2011 und immerhin um einen Drittel höher als 2013. Diese Kombination führte zu einer Schadenssumme durch Hagel im Jahr 2021 von 725 Mio. CHF, mehr als das Dreifache des Schadens von 2011 (206 Mio. CHF).

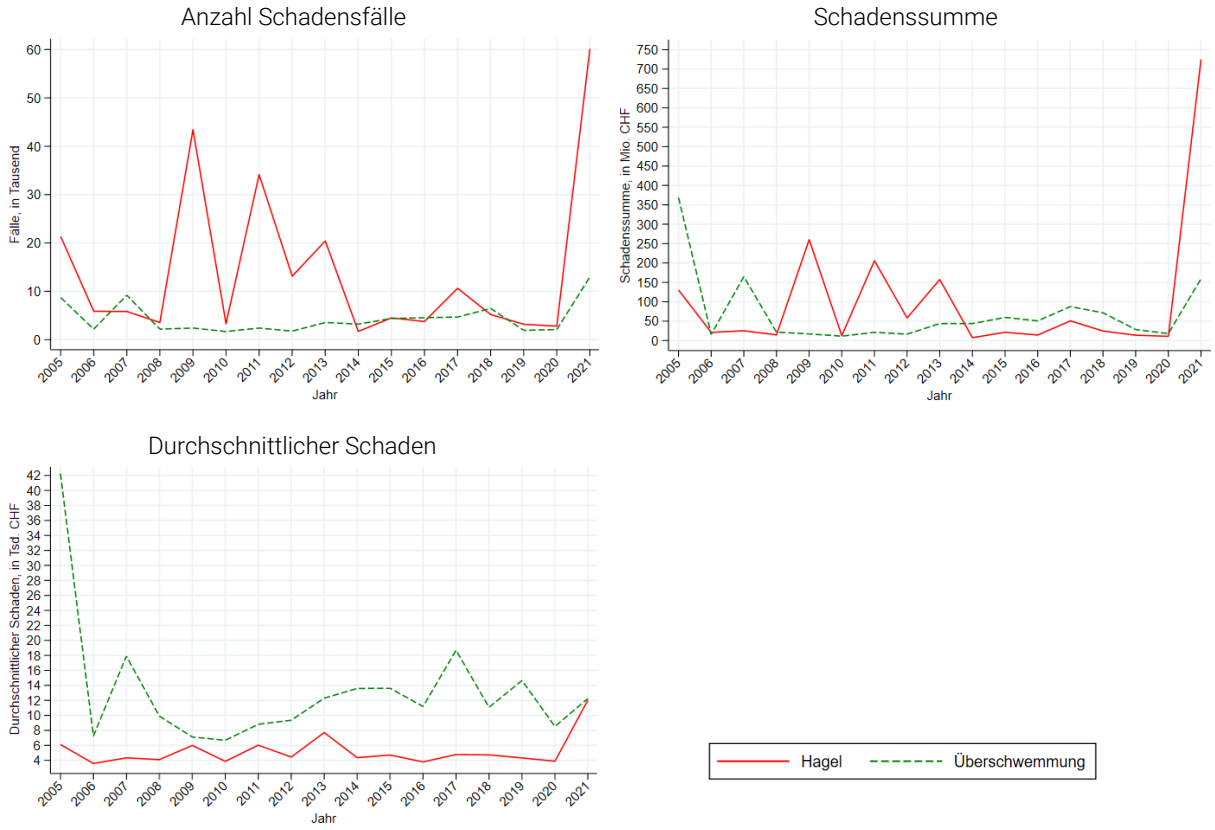


Abbildung 13: Entwicklung der Überschwemmungs- und Hagelschäden in allen KGV-Kantonen, 2005-2021

Die Schäden durch Überschwemmung erreichten 2021 eine Summe von ca. 159 Mio. CHF. Das ist immerhin die zweithöchste Schadenssumme, ähnlich wie im Jahr 2007. Die Schäden im Jahr 2005 lagen mehr als doppelt so hoch bei 369 Mio. CHF. Im Vergleich des Jahres 2021 mit 2005 zeigt sich, dass im Jahr 2021 mehr Fälle registriert wurden als im Jahr 2005, dass aber der durchschnittliche Schaden deutlich tiefer lag (2021: 12'257 CHF; 2005: 42'264 CHF).

Basierend auf den Ergebnissen in der meteorologischen und hydrologischen Analyse in Kapitel 2 haben wir die Kantone Aargau, Freiburg, Luzern, Zug und Zürich vertieft untersucht. Ausschlaggebend war, dass diese Kantone sowohl von den Unwettern 2021 als auch von jenen im Jahr 2005 betroffen waren. Einen

[1] Die Schadenssummen sind nicht mit der Baupreisentwicklung korrigiert. Die Baupreise und damit auch die Kosten der Schadenbehebung sind schweizweit zwischen 2005 und 2021 nur moderat um ca. 15 % gestiegen. Für eine Analyse von 1950 bis 2020 für alle KGV-Kantone vergleiche Imhof 2022.

ersten summarischen Vergleich geben Abbildung 14 hinsichtlich der Hagelschäden und Abbildung 15 bezüglich der Schäden durch Überschwemmungen.

Bei den Hagelschäden zeigt sich weitgehend dasselbe Muster wie für die Gesamtheit aller KGV-Kantone. Für die Kantone Freiburg, Luzern, Zug und Zürich war das Jahr 2021 jenes mit den bei weitem meisten Schadensfällen in der untersuchten Zeitperiode. Der durchschnittliche Schaden war im Jahr 2021 bei allen fünf Kantonen hoch, in Luzern mit über 22'251 CHF sogar sehr hoch. Im Kanton Luzern fielen mit Schäden von 364 Mio. CHF etwa 50 Prozent der Hagelschäden aller KGV-Kantone an. Aber auch in den Kantonen Zürich, Zug und Freiburg waren die Schäden deutlich höher als in den vorangehenden Jahren. Eine Ausnahme ist der Kanton Aargau. Dieser war im Jahr 2011 von einem ausgedehnten Hagel mit vielen Schadensfällen betroffen. Die Hagelschäden 2011 waren dort mit 157 Mio. CHF deutlich höher als 2021 (37 Mio. CHF).

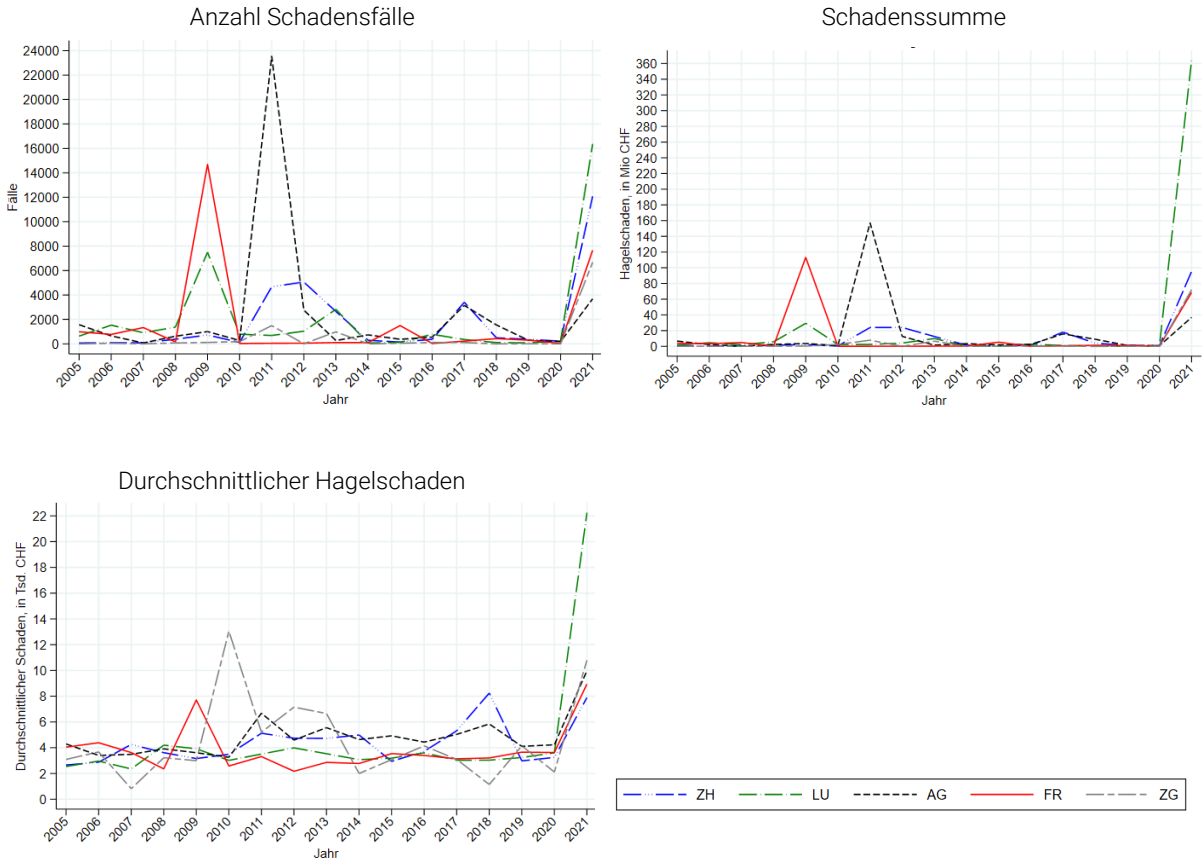


Abbildung 14: Entwicklung der Hagelschäden in den Kantonen Zürich, Luzern, Aargau, Freiburg und Zug, 2005-2021

Die Schäden durch Überschwemmung 2021 lagen in den fünf Kantonen zwischen 10 und 26 Mio. CHF. Alle fünf Kantone verzeichneten viele Schadensfälle. In Freiburg und Zug wurden mit Abstand am meisten Fälle seit 2005 registriert, aber auch Zürich erreichte den zweithöchsten Wert. Die Anzahl Fälle waren in Luzern am höchsten innerhalb dieser Gruppe, aber dennoch war die Zahl kleiner als beim Unwetter 2005. In Freiburg, Zug, und Zürich blieben die durchschnittlichen Schäden unter 13'000 CHF. In den Kantonen Luzern und Aargau waren die Durchschnittsschäden höher (zwischen 21'000 und 26'000 CHF). Immerhin lagen die Durchschnittsschäden in Luzern deutlich tiefer als beim Unwetter 2005.

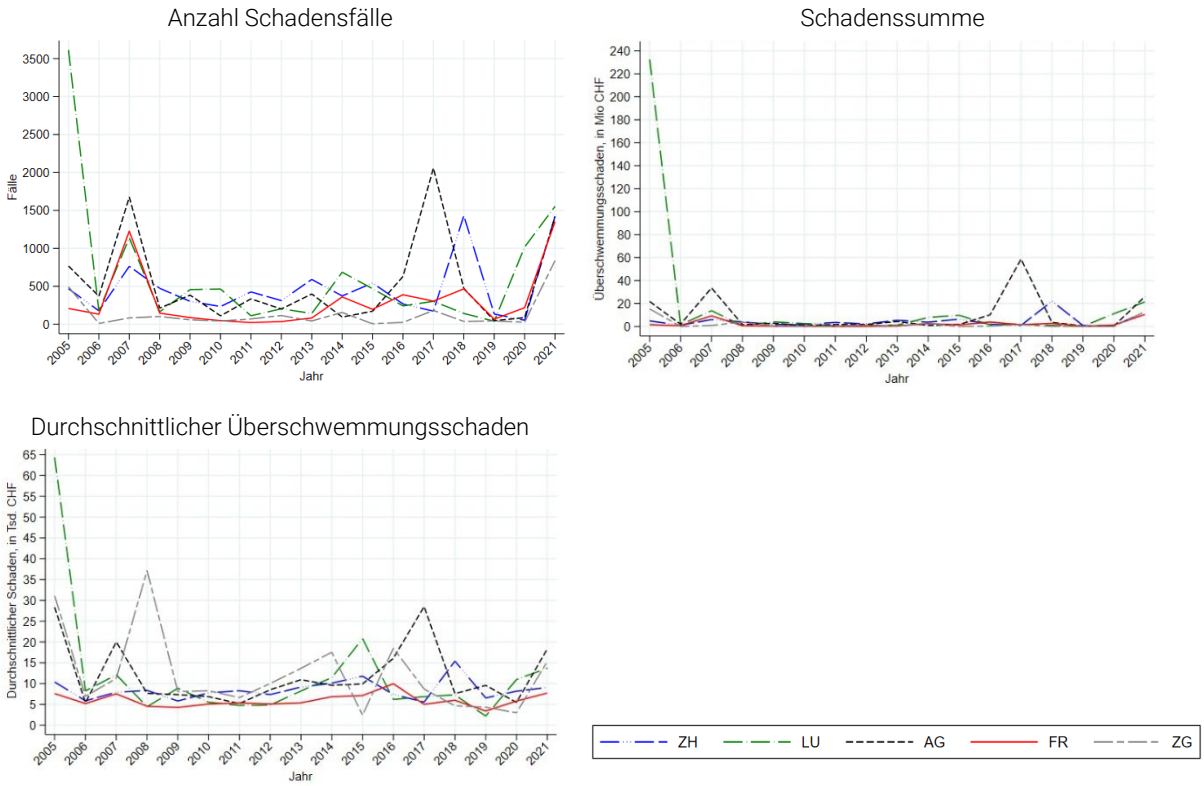


Abbildung 15: Entwicklung der Überschwemmungsschäden in den Kantonen Zürich, Luzern, Aargau, Freiburg und Zug, 2005-2021

Zusammenfassend lässt sich aus diesem Vergleich in den beiden Abbildungen ableiten, dass im Jahr 2021 ausserordentlich grosse Hagelschäden entstanden, weil die Hagelzüge bei vielen Gebäuden Schäden verursacht haben und die Schäden an den einzelnen Objekten hoch bzw. im Kanton Luzern sogar sehr hoch waren. Die Schäden durch Überschwemmungen waren ebenfalls hoch, wenn auch deutlich tiefer als in den Jahren mit Extremereignissen. Die Schäden entstanden durch eine Vielzahl von Fällen mit moderaten Durchschnittskosten.

3.3 Betroffenheit und Schaden

Die im vorangehenden Abschnitt ausgewiesene Schadenssumme hängt unter anderem davon ab, wie intensiv ein Unwetter ist (Hazard) und wie viele Gebäude von diesem Unwetter betroffen sind (Exposition). Zieht ein Hagelzug über weitgehend unbesiedelten Raum, sind die Schäden wesentlich tiefer, als wenn er über eine Stadt hinwegzieht. Um diesen Aspekt in Bezug auf das Unwetter 2021 zu analysieren, vergleichen wir in diesem Abschnitt das Unwetter 2021 mit ausgewählten Unwettern in den Kantonen Aargau, Luzern und Zürich.

Diese Analyse setzt voraus, dass drei Datenquellen miteinander verbunden werden können. So müssen die Schadensdaten den Policendaten (Gebäudedaten) zugeordnet und die Adressdaten müssen ins Koordinatensystem transferiert werden. Anschliessend können die Daten von MeteoSchweiz zu Hagel und Niederschlag, welche als Rasterdaten in einer Auflösung mit einer Kantenlänge von einem Kilometer vorliegen, den Gebäuden zugeordnet werden. Die Hageldaten liegen differenziert nach sechs Intensitätsstufen vor. Die Niederschlagsmengen werden mit ihrer Jährlichkeit für verschiedene Dauerstufen erfasst. Pegeldaten der Flüsse werden nicht berücksichtigt, da eine Zuordnung zu den einzelnen Gebäuden nicht

flächendeckend automatisiert werden kann. Um Überflutungen aufgrund von ausufernden Fliessgewässern systematisch zu berücksichtigen, wäre eine flächendeckende hydrodynamische Simulation erforderlich oder es müsste ein differenziertes Klassifikationsschema wie in Bernet et al. (2017) verwendet werden. Dies ist aus Ressourcengründen nicht möglich. Durch die Verwendung der Niederschlagsintensitäten können wir folglich in erster Linie Überflutungen aufgrund von Starkregen (d. h. Oberflächenwasser) abbilden und nicht so sehr aufgrund von Ausuferungen von Fliessgewässern und Seen.

Eine Ungenauigkeit entsteht dadurch, dass die verwendeten Rasterdaten zu Hagel (MESHS-Datensatz; vgl. Kapitel 2.5) mit Unsicherheiten behaftet sind. Die Rasterdaten basieren auf Radardaten und stellen die Schätzungen der maximal erwarteten Hagelgrösse dar. Unsicher ist jedoch, welche Hagelgrösse auf den Boden trifft. Auch wird nicht erfasst, wie viele Körner pro Fläche fallen. Unterdessen gibt es erste Forschungsarbeiten, die zusätzlich zu den Radardaten sogenannte Crowd-Daten nutzen. Beispielsweise Daten der App von MeteoSchweiz, in welchem die Bevölkerung Rückmeldungen zu Hagel geben kann, und Daten automatischer Hagelsensoren.[2] Die Ergebnisse von Kopp et al. (2022) und Barras et al. (2019) weisen darauf hin, dass die Radar- und Crowd-Daten bei grossem Hagel kohärent sind. Die grössten Hagelkörner wurden in Gebieten gemeldet wurden, in denen auch die MESHS-Werte am höchsten waren.

Für das Hagelereignis vom 28. Juni 2021 haben wir Zugang zu Crowd-Daten von MeteoSchweiz erhalten und konnten unsere Analyse für beide Datenquellen durchführen. Die Ergebnisse sind im Anhang 8.2.3 in Tabelle 18 dargestellt. Sie zeigen, dass die Resultate für dieses Ereignis robust sind, d.h. die geschätzten Koeffizienten sind bei beiden Datenquellen vergleichbar. Dieses Ergebnis weist darauf hin, dass die Verwendung der MESHS-Daten zu belastbaren Resultaten führt. Und für unsere Analyse über einen langen Zeitraum sind die MESHS-Daten die einzigen verfügbaren Daten, mit denen wir gebäudegenau abschätzen können, wie viele Gebäude welcher Unwetterintensität ausgesetzt waren und wie stark die gemeldeten Schäden für Hagel mit dem lokalen Unwetter korrelieren.

In den Auswertungen beschränken wir uns aufgrund der Herausforderungen bei der Datenaufbereitung (siehe Datenaufbereitung und Datenanforderungen im Anhang 8.2.1) auf die Kantone Aargau, Luzern und Zürich. Dabei wird jeweils das Unwetter 2021 mit einem vergleichbaren Unwetter im jeweiligen Kanton gegenübergestellt. Das Auswahlkriterium ist die gesamte Schadenssumme durch Hagel bzw. Überschwemmung. Bei Überschwemmungen beschränken wir uns auf den Vergleich mit dem Unwetter im August 2005 im Kanton Luzern. Das war das bei weitem grösste Überschwemmungsereignis der letzten 20 Jahre, das sich etwa im Kanton Luzern stark auswirkte. Zürich und Aargau waren im August 2005 nur leicht betroffen. Beim Hagel werden die maximalen Monatswerte des entsprechenden Jahres verwendet, beim Niederschlag die maximalen Werte des entsprechenden Monats.

Tabelle 3: Ausgewählte Unwetter für den Vergleich mit dem Unwetter 2021

Unwetterart	Aargau	Luzern	Zürich
Hagel	2011	2009	2012
Überschwemmung	-	08.2005	-

Erläuterungen: Bei Hagel werden die maximalen Monatswerte des entsprechenden Jahres verwendet, beim Niederschlag die maximalen Werte des entsprechenden Monats.

[2] Im Rahmen des Forschungsprojektes scClim arbeiten zurzeit Forschende an der ETH Zürich, der Universität Bern, bei Agroscope, und bei MeteoSchweiz an einer Verbesserung der Datenlage zu Hagel und an einer präziseren Abschätzung der Schäden durch Hagel. Siehe: https://scclim.ethz.ch/. Geleitet wird das Forschungsprojekt unter anderem von Prof. Dr. David Bresch. Er und Timo Schmid haben uns beim Zugang zu den Ergebnissen des Projekts unterstützt.

3.3.1 Räumliche Darstellung am Beispiel des Kantons Zürichs

In diesem Abschnitt wird mit Hilfe der Abbildung 16 der Zusammenhang zwischen Unwetterintensität, Betroffenheit und Schäden am Beispiel des Kantons Zürich für die Hagelereignisse 2021 (obere Bilder) und 2012 (untere Bilder) visualisiert. Dabei wird die höchste in diesem Jahr gemessene monatliche Hagelintensität ausgewählt. Es wird unterstellt, dass die grösste Hagelgrösse den Schaden verursacht hat. Die Bilder zeigen von links nach rechts für jedes Rasterfeld mit einer Kantenlänge von einem Kilometer

– die Hagelintensität,
– die Anzahl Gebäude mit Schadensmeldungen durch Hagel und
– den Anteil der Gebäude mit Schadensmeldungen in Prozent des Gebäudebestands.

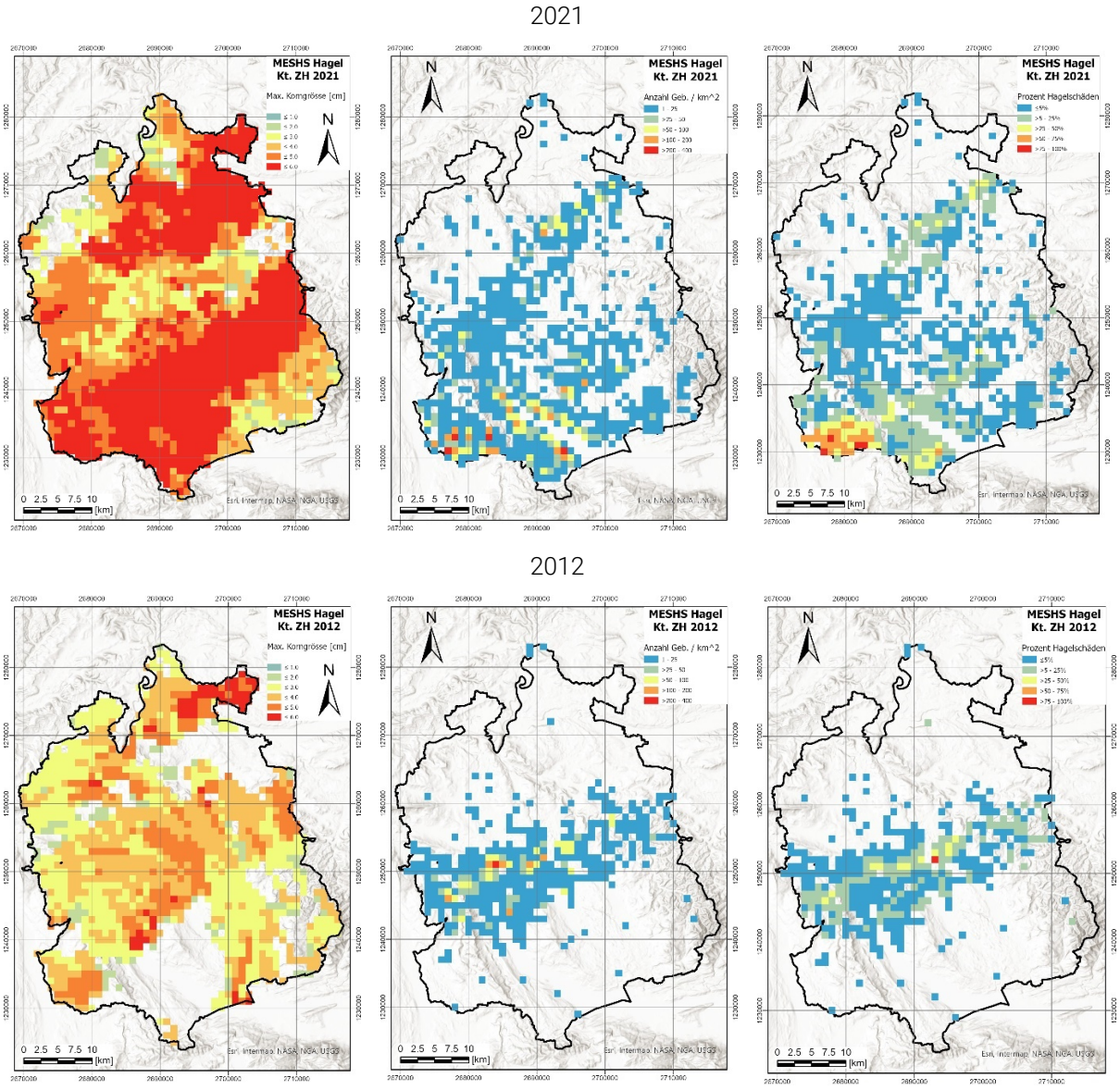


Abbildung 16: Hagelereignisse im Kanton Zürich 2021 und 2012

Quelle: Hageldatendaten von MeteoSchweiz, Schadensdaten von der Gebäudeversicherung Zürich.

Der Vergleich zeigt, dass der Kanton Zürich in beiden Jahren grossflächig von Hagel betroffen war, aber dass der Hagel im Jahr 2021 eine wesentlich höhere Intensität (Korngrösse) aufwies. Jedoch sind die Schadensbilder in der mittleren Spalte nicht deckungsgleich mit den Unwetterintensitäten. Das ist die Folge der Siedlungsstruktur. Zieht ein Hagelzug über dicht besiedeltes Gebiet, dann sind mehr Gebäude

dem Hagel ausgesetzt (grössere Exposition) und folglich sind mehr Schäden zu erwarten. So ist auffallend, dass in beiden Hagelereignissen der Zipfel im Nordosten des Kantons (Stammheim) starkem Hagel ausgesetzt war, aber nur wenige Hagelschäden an Gebäuden dort gemeldet wurden. Das liegt zum einen daran, dass diese Gemeinde dünn besiedelt und damit die Exposition klein ist. Es ist zu vermuten, dass wie bei anderen Hagelereignissen in dieser Gemeinde beträchtliche Schäden in der Landwirtschaft entstanden sind. [3] Zum anderen war der Hagel möglicherweise von Sturm begleitet und ein Teil der Gebäudeschäden als Sturmschäden kategorisiert.

Einen Hinweis auf die Grösse der tatsächlich am Boden oder auf den Dächern angekommene Hagelkörner liefern die Auswertungen zum Anteil der Gebäude innerhalb eines Rasters, die Hagelschäden melden. Liegen die Werte über 75%, sind die Raster in den Bildern rechts rot gefärbt. Im Jahr 2021 war besonders das Knonaueramt im Südwesten des Kantons Zürich stark betroffen. Eine systematische Auswertung folgt im nächsten Abschnitt.

3.3.2 Einordnung des Hagelunwetters 2021 in den Kantonen Aargau, Luzern und Zürich

In den folgenden Tabellen sind die Werte der Betroffenheit durch Hagel für die Kantone Aargau, Luzern und Zürich dargestellt. Ein Gebäude gilt als «betroffen», wenn es gemäss den Hageldaten von MeteoSchweiz einem Hagel mit Hagelgrösse 2 cm oder grösser ausgesetzt war, unabhängig davon, ob das Gebäude einen Schaden meldet oder nicht. Im entsprechenden Jahr sind alle Hagelereignisse der Monate April bis September erfasst. Innerhalb eines Monats wird jeweils nur die höchste Hagelintensität berücksichtigt. Jedoch kann ein Gebäude in den sechs Monaten eines Jahres mehrfach von Hagel betroffen sein. Dann wird das Objekt auch mehrfach in den Tabellen erfasst. [4]

Die Hagelintensität wird in drei Kategorien zusammengefasst: kleiner Hageldurchmesser (2 bis und mit 2.5 cm), mittlere Grösse (3 bis und mit 4.5 cm) und grosse Hagelgrösse (5 cm und grösser). Diese Einteilung ist von der Überlegung geleitet, dass Hagelgrössen unter 3 cm wesentlich kleinere Schäden verursachen sollten, da viele Baumaterialen einer Hagelintensität bis 3 cm standhalten. Zudem prüfen wir, ob die Schäden ab einer Hagelgrösse von 5 cm weiter zunehmen im Vergleich zu Hagelgrössen zwischen 3 bis 5 cm. Die ausgewiesenen Schadensdaten stellen die im entsprechenden Jahr erfassten Schäden bei den entsprechenden Hagelintensitäten dar. [5]

Aus den drei Tabellen 4 bis 6 lassen sich folgende Ergebnisse ableiten:

– Die verschiedenen Hagelzüge in allen Monaten des Jahres 2021 haben im Kanton Luzern weniger Gebäude betroffen als die verschiedenen Hagelunwetter im Jahr 2009. Ebenso waren im Kanton Aargau 2021 weniger Gebäude Hagel ausgesetzt als 2011. Demgegenüber waren im Kanton Zürich 2021 etwa 31% mehr Gebäude Hagel ausgesetzt als 2012. Entsprechend waren die betroffenen Versicherungswerte im Kanton Zürich 2021 höher (+29%), und in den Kantonen Luzern und Aargau kleiner (- 23 bzw. - 43%).

[3] Einen guten Überblick über die Schäden in Stammheim im Jahr 2018 gibt ein Video von TeleZüri: https://tv.telezueri.ch/zueri-news/millionen-unwetterschaden-in-stammheim-133430606

[4] Dieses Vorgehen ist deshalb zweckmässig, da Gebäude, die innerhalb eines Jahres mehreren Hagelzügen ausgesetzt sind, ein höheres Schadensrisiko aufweisen. Die Datenanalyse bestätigt dies. So sind für einzelne Gebäude in verschiedenen Monaten des Jahres 2021 Schadensmeldungen wegen Hagel erfasst. Unser Vorgehen unterscheidet sich von der Auswertung von Imhof 2022, 20 ff.. Dort sind die Schäden in Bezug gesetzt zum gesamten Gebäudebestand, während in dieser Studie der Bezug nur zu den vom entsprechenden Unwetter betroffenen Gebäudebestand erfolgt.

[5] Weil vereinzelt auch Gebäude Schäden verzeichnen, die einer Hagelgrösse kleiner als 2 cm ausgesetzt waren, entstehen kleine Differenzen zu den von den Gebäudeversicherungen gemeldeten Hagelschäden.

Tabelle 4: Analyse der Hagel ausgesetzten Objekte im Kanton Luzern

	2009	2021
Hagelgrösse 2-2.5 cm		
Schaden (Mio. CHF)	1.8	1.2
Anzahl Objekte	54’576	38’674
Ausgesetzter Versicherungswert (Mio. CHF)	63’913.5	39’249.8
Schaden in % des ausgesetzten Versicherungswerts	0.003%	0.003%
Schaden pro Mio. ausgesetztem Versicherungswert (CHF)	28.7	30.2
Hagelgrösse 3-4.5 cm		
Schaden (Mio. CHF)	22.4	16.2
Anzahl Objekte	111’960	50’729
Ausgesetzter Versicherungswert (Mio. CHF)	122’657.3	54’280.3
Schaden in % des ausgesetzten Versicherungswerts	0.018%	0.030%
Schaden pro Mio. ausgesetztem Versicherungswert (CHF)	182.7	299.1
Hagelgrösse grösser & gleich 5 cm		
Schaden (Mio. CHF)	4.1	350.2
Anzahl Objekte	39’284	73’053
Ausgesetzter Versicherungswert (Mio. CHF)	30’012.7	74’211.9
Schaden in % des ausgesetzten Versicherungswerts	0.014%	0.472%
Schaden pro Mio. ausgesetztem Versicherungswert (CHF)	138.0	4’718.4
Summe		
Total Schaden (ohne Schaden bei Hagel < 2 cm) (Mio. CHF)	28.4	367.6
Total Anzahl ausgesetzte Objekte	205’820	162’456
Total ausgesetzte Versicherungswerte (Mio. CHF)	216583.5	167742.0

Erläuterungen: Objekte und deren Versicherungswerte sind mehrfach gezählt, wenn sie im entsprechenden Jahr mehrfach einem Hagel ausgesetzt waren.

- Die massiv höheren Hagelschäden in Luzern und Zürich im Jahr 2021 sind darauf zurückzuführen, dass wesentlich mehr Gebäude einer Hagelgrösse 5 cm und mehr ausgesetzt waren und gleichzeitig in dieser Kategorie sehr hohe Schäden pro ausgesetzten Versicherungswert registriert wurden. So waren im Kanton Luzern 2021 45% der betroffenen Gebäude einer Hagelgrösse von 5 cm und mehr ausgesetzt. Im Vergleichsjahr 2009 waren dies nur 19%. Im Kanton Zürich zeigt sich ein ähnliches Bild: 39% der Gebäude waren 2021 von grossem Hagel betroffen, 2012 waren es lediglich 5%. Im Kanton Aargau hingegen waren 2021 nur 11% der Gebäude einer Hagelgrösse von 5 cm und mehr ausgesetzt.
- Die Auswertungen zeigen, dass in den Kantonen Zürich und vor allem Luzern die Hagelschäden 2021 im Verhältnis zum ausgesetzten Versicherungswert bei allen Hagelkategorien höher waren als im Vergleichsjahr. Besonders ausgeprägt war der Anstieg bei der höchsten ausgewiesenen Hagelgrösse. So betrug der Schaden in dieser Kategorie im Durchschnitt im Kanton Luzern 4'718 CHF, im Jahr 2009 lediglich 138 CHF pro Million Franken ausgesetzten Versicherungswert. Dieses Muster zeigt sich auch im Kanton Zürich, wenn auch bei wesentlich tieferen Werten (309 CHF im Jahr 2021, 28 CHF in 2012). Im Kanton Aargau hingegen nahmen diese Werte in der mittleren und höchsten Kategorie ab. In der höchsten Hagelkategorie war dieser Wert bereits 2011 sehr hoch (2’018 CHF), aber immerhin blieb der Wert 2021 leicht tiefer (1'614 CHF).
- Ein Vergleich der Schadensdaten zwischen den drei Hagelkategorien zeigt, dass 2021 der Schaden im Verhältnis zum Versicherungswert mit grösserer Hagelintensität zunimmt. Insbesondere sind die Schäden bei Hagelgrösse 5 cm und mehr deutlich höher als bei der Hagelgrösse zwischen 3 und 4.5 cm. Dieser Sprung zeigt sich nicht 2012 in Zürich und 2009 in Luzern, jedoch im Aargau 2011.

Tabelle 5: Analyse der Hagel ausgesetzten Objekte im Kanton Zürich

	2012	2021
Hagelgrösse 2-2.5 cm		
Schaden (Mio. CHF)	1.2	3.2
Anzahl Objekte	91’796	71’823
Ausgesetzter Versicherungswert (Mio. CHF)	163’086.2	171’935.9
Schaden in % des ausgesetzten Versicherungswerts	0.001%	0.002%
Schaden pro Mio. ausgesetztem Versicherungswert (CHF)	7.4	18.6
Hagelgrösse 3-4.5 cm		
Schaden (Mio. CHF)	10.6	10.6
Anzahl Objekte	232’773	203’753
Ausgesetzter Versicherungswert (Mio. CHF)	469’241.5	424’414.7
Schaden in % des ausgesetzten Versicherungswerts	0.002%	0.002%
Schaden pro Mio. ausgesetztem Versicherungswert (CHF)	22.5	24.9
Hagelgrösse grösser & gleich 5 cm		
Schaden (Mio. CHF)	0.8	78.9
Anzahl Objekte	18’412	174’205
Ausgesetzter Versicherungswert (Mio. CHF)	27’374.6	255’019.4
Schaden in % des ausgesetzten Versicherungswerts	0.003%	0.031%
Schaden pro Mio. ausgesetztem Versicherungswert (CHF)	28.1	309.3
Summe		
Total Schaden (ohne Schaden bei Hagel < 2 cm) (Mio. CHF)	12.5	92.6
Total Anzahl ausgesetzte Objekte	342’981	449’781
Total ausgesetzte Versicherungswerte (Mio. CHF)	659’702.4	851’370.0

Erläuterungen: Objekte und deren Versicherungswerte sind mehrfach gezählt, wenn sie im entsprechenden Jahr mehrfach einem Hagel ausgesetzt waren.

Zusammenfassend zeigt sich, dass der Anstieg der Hagelschäden einerseits auf die grössere Betroffenheit durch grossen Hagel (5 cm und mehr) zurückzuführen ist und andererseits durch die teilweise höheren Schäden in dieser Kategorie im Vergleich zu früheren Ereignissen. Ein möglicher Grund könnte darin liegen, dass im Jahr 2021 in einigen Regionen die Kombination von Hagel mit Starkniederschlag zu höheren Schäden an den Gebäuden geführt hat. So zeigt die Fallstudie im Kanton Luzern (in Kapitel 6.2), dass der Hagel nicht nur Dächer zerstört, sondern der gleichzeitige Niederschlag wegen der defekten Dächer hohe Wasserschäden innerhalb des Gebäudes verursacht hat.

Tabelle 6: Analyse der Hagel ausgesetzten Objekte im Kanton Aargau

	2011	2021
Hagelgrösse 2-2.5 cm		
Schaden (Mio. CHF)	2.9	2.1
Anzahl Objekte	85’748	61’651
Ausgesetzter Versicherungswert (Mio. CHF)	91’224.8	65’842.2
Schaden in % des ausgesetzten Versicherungswerts	0.003%	0.003%
Schaden pro Mio. ausgesetztem Versicherungswert (CHF)	31.6	32.4
Hagelgrösse 3-4.5 cm		
Schaden (Mio. CHF)	32.9	5.9
Anzahl Objekte	107’411	63’549
Ausgesetzter Versicherungswert (Mio. CHF)	124'373.2	67'178.3
Schaden in % des ausgesetzten Versicherungswerts	0.026%	0.009%
Schaden pro Mio. ausgesetztem Versicherungswert (CHF)	264.6	88.0
Hagelgrösse grösser & gleich 5 cm		
Schaden (Mio. CHF)	94.0	25.8
Anzahl Objekte	47’772	15’943
Ausgesetzter Versicherungswert (Mio. CHF)	46’555.0	15’987.5
Schaden in % des ausgesetzten Versicherungswerts	0.202%	0.161%
Schaden pro Mio. ausgesetztem Versicherungswert (CHF)	2’018.1	1’613.9
Summe		
Total Schaden (ohne Schaden bei Hagel < 2 cm) (Mio. CHF)	129.7	33.9
Total Anzahl ausgesetzte Objekte	240’931	141’143
Total ausgesetzte Versicherungswerte (Mio. CHF)	262’153.0	149’008.0

Erläuterungen: Objekte und deren Versicherungswerte sind mehrfach gezählt, wenn sie im entsprechenden Jahr mehrfach einem Hagel ausgesetzt waren.

3.3.3 Einordnung des Niederschlags 2021 im Kanton Luzern

Gemäss Auftrag soll das Unwetter 2021 mit jenem im Jahr 2005 verglichen werden. Beim Niederschlag bietet sich dieser Vergleich für den Kanton Luzern an. Wie Abbildung 15 zeigt, war insbesondere der Kanton Luzern 2005 von sehr hohen Überschwemmungsschäden betroffen. Die detaillierten Resultate finden sich im Anhang 8.2.2 in Tabelle 15 für das Ereignis im Juli 2021 und in Tabelle 16 für August 2005. In Tabelle 7 sind die Ergebnisse für die beiden ausgewählten Ereignisse zusammenfassend dargestellt. Dabei werden zwei Formen von Niederschlagsintensitäten unterschieden, einerseits der Starkniederschlag mit kurzer Dauer (mit einer Dauerstufe 1 h) und der langanhaltende Niederschlag (mit einer Dauerstufe von 24 h). Ausgewiesen sind die Gebäude, die in der Dauerstufe von 1 h bzw. 24 h unterschiedlichen Jährlichkeiten ausgesetzt waren.

Die Ergebnisse zeigen deutliche Unterschiede zwischen den beiden Ereignissen. Der Niederschlag im Juli 2021 war gekennzeichnet durch kurzzeitigen Starkniederschlag. Viele Objekte waren bei der Dauerstufe 1 h von einer Jährlichkeit von 2 bis 10 Jahren betroffen und 90% der Schäden sind bei Gebäuden entstanden, die diesem Ereignis ausgesetzt waren. Demgegenüber ist im Unwetter 2005 kein Starkniederschlag (Dauerstufe 1 h) aufgetreten.

Tabelle 7: Analyse der Niederschlag ausgesetzten Objekte im Kanton Luzern

Niederschlags-intensität in Jährlichkeiten	Jahr	Anzahl Objekte	Versicherungs-wert in Mio. CHF	Überschwem-mungsschaden in Mio. CHF	Schaden pro Mio. CHF ausgesetztem Versi-cherungswert (CHF)
Dauerstufe 1 h					
2 -10	2021	12’187	24’404	10.3	423
	2005	0	0	0	-
Dauerstufe 24 h					
>2	2021	27’090	55’700	5.4	97
	2005	27’657	56’676	191.3	3’376
2 -10	2021	22’732	49’456	0.5	9
	2005	18’452	30’890	164.0	5’308
>10	2021	4’302	6’173	4.9	801
	2005	9’205	25’785	27.3	1060

Erläuterung: Dieselben Gebäude, die Niederschlagsintensitäten in beiden Dauerstufen ausgesetzt waren, sind in verschiedenen Gruppen vertreten. Diese Doppelzählungen werden in der Detailauswertung im Anhang 8.2.2 vermieden.

Demgegenüber gibt es Parallelen bei länger andauerndem Niederschlag, gemessen mit der Dauerstufe 24 h. Dort waren in den beiden Unwettern etwa gleich viele Gebäude und ähnliche Versicherungswerte einem Niederschlag mit der Jährlichkeit grösser als 2 Jahren ausgesetzt. Jedoch waren die Schäden im Jahr 2005 wesentlich höher, sowohl absolut als auch bezogen auf die betroffenen Versicherungswerte. Pro Million CHF Versicherungswert, welcher einer Jährlichkeit von mindesten 2 Jahren ausgesetzt war, entstanden 2021 Schäden von 97 CHF, im Jahr 2005 waren es 3'376 CHF. Die grossen Unterschiede stammen aus zwei Effekten: Erstens waren im August 2005 mehr als doppelt so viele Gebäude einem Niederschlag mit einer Jährlichkeit grösser als 10 Jahren ausgesetzt als im Juli 2021. Zweitens waren die Schäden an den Gebäuden, die einer Jährlichkeit zwischen 2 und 10 Jahren ausgesetzt waren, 2005 wesentlich höher als 2021 (5'308 vs. 9 CHF pro Mio. CHF Versicherungswert). Wie in Bezzola und Hegg (2007) aufgezeigt, haben 2005 fluviale Hochwasser einen grossen Teil dieser Schäden verursacht. Durch die lokalen Niederschlagsdaten können wir die fluvialen Überflutungen nicht abbilden. Dazu wären Simulationen der Überschwemmungsbereiche nötig. Immerhin zeigen die Ergebnisse der hydrologischen Analyse in 2.4.2 (Abbildung 10), dass die Abflussdaten an den Pegeln, gemessen mit der Jährlichkeit, in der Zentralschweiz im Jahr 2021 unter den Werten von 2005 blieben. Deshalb war es möglicherweise eine Kombination von geringerem langandauerndem Niederschlag, den dadurch geringeren Pegelständen und wirksameren dauerhaften und temporären Schutzmassnahmen, welche 2021 zu tieferen Überschwemmungsschäden als 2005 geführt haben.

Alles in allem standen im Jahr 2021 die höheren Schäden durch Überflutungen aufgrund von Starkniederschlägen wesentlich tieferen Schäden durch Überflutungen aufgrund von Niederschlägen der Dauerstufe 24 h gegenüber.

3.4 Analyse der Schadenswahrscheinlichkeiten

In diesem Abschnitt wird untersucht, welchen Einfluss die von den Gebäudeversicherungen mitfinanzierten Objektschutzmassnahmen auf die Schadenswahrscheinlichkeit haben, d.h. wie wirksam die unterstützten Massnahmen sind. Dabei ist zu berücksichtigen, dass, wie im vorangehenden Abschnitt gezeigt,

die Unwetterintensität entscheidend für die Schadenshöhe und damit auch für die Schadenswahrscheinlichkeit ist. Damit der Einfluss der Objektschutzmassnahmen der Gebäudeversicherungen statistisch untersucht werden kann, müssen genügend Fälle vorhanden sein. Dies ist für Hagel- und Überschwemmungsmassnahmen in den Kantonen Aargau und Zürich der Fall, in Luzern jedoch nur für Massnahmen gegen Überschwemmungen. Für Luzern liegen uns nur 31 Massnahmen gegen Hagel vor, was eine zu kleine Zahl für die statistische Analyse ist. Interessant wäre, die Massnahmen stärker zu differenzieren und auch die Kosten der Massnahmen zu berücksichtigen. Leider erlauben die verfügbaren Daten keine solche Differenzierung und keine Kosten-Nutzen-Analysen. Dazu müssten die Massnahmen differenziert und mit Kosten systematisch und maschinell lesbar erfasst sein, was nicht der Fall ist.

Methodisch verwenden wir eine Paneldatenanalyse (Croissant und Millo, 2019). Diese Methode verbindet die beiden Dimensionen Querschnitt (alle Gebäude in einem Kanton) und Zeit (über den gesamten untersuchten Zeitraum 2005 bis 2021). Bei den Daten für Hagel werden Monatswerte für April bis September genutzt. Zur Messung der Niederschlagsintensität verwenden wir die täglichen Werte, abgestuft nach Dauerstufen (1 h bis 72 h) für die wichtigsten Niederschlagsperioden in diesem Zeitraum. Dabei arbeiten wir mit den Jährlichkeiten (bis 100 Jahren). Durch die grosse Menge an Beobachtungen steigt die Anzahl der Freiheitsgrade und sinkt die Kollinearität, so dass die Schätzer effizienter werden. Zudem kann durch die Verwendung einer individuenspezifischen Konstante der Einfluss nicht modellierter Variablen eingefangen werden. Das ist für unsere Analyse wichtig, da die beobachteten Gebäude individuelle Eigenschaften haben (z.B. Lage), die wir auf diese Weise bei der Analyse automatisch berücksichtigen.

In einem ersten Schritt schätzen wir mit einem Logit-Modell die **bedingte** Schadenswahrscheinlichkeit, d.h. wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, dass ein Gebäude einen Schaden erleidet. Die Wahrscheinlichkeit ist bedingt, da wir nur diejenigen Objekte berücksichtigen können, die im Laufe der Zeit einen Schaden gemeldet und/oder eine Massnahme ergriffen haben. Die bedingte Wahrscheinlichkeit misst folglich, wie wahrscheinlich ein Unwetter einen Schaden bei jenen Objekten auslöst, die im Untersuchungszeitraum Schäden oder Massnahmen gemeldet haben.

Das gewählte methodische Vorgehen unterscheidet sich von der Methodik, die für den Bericht zur Wirkung von Massnahmen zur Elementarschadenprävention im Rahmen der 9. Ausschreibung der Präventionsstiftung verwendet wurde. Röthlisberger et al. (2017) schätzten die Wirkung einzelner Massnahmen nicht gebäudegenau, sondern basierend auf den Einfluss auf Durchschnittsschadenswerte. Die Wirkungen einzelner Massnahmen (z.B. Dach und Fassade mind. HW3) basiert auf Annahmen, die durch Expertengespräche und Umfrage validiert wurden (Röthlisberger et al. 2017, 178 ff.).

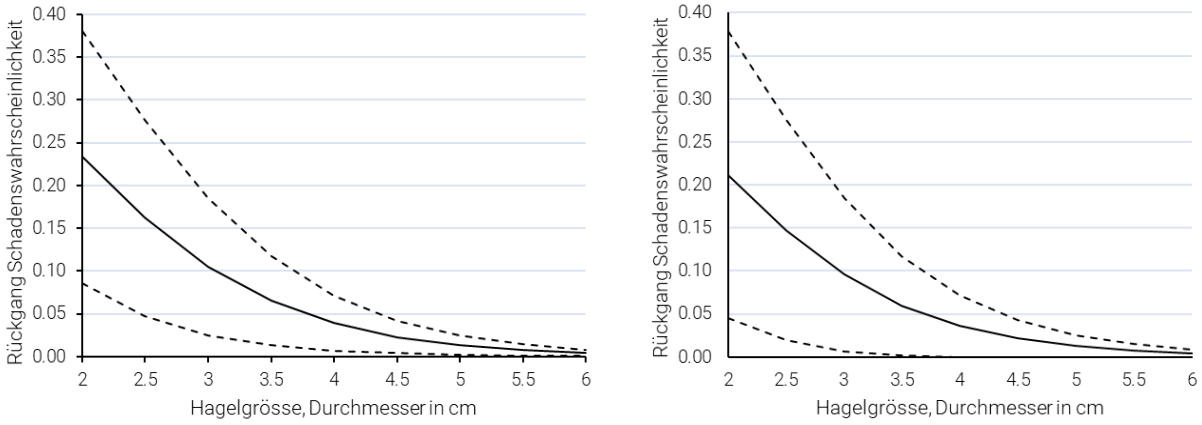
Unsere Schätzergebnisse sind im Anhang 8.2.3 dargestellt und erklärt. Die Ergebnisse zeigen die zu erwartenden Wirkungen. Sowohl bei Hagel als auch bei Überschwemmung haben Objekte, bei denen die Gebäudeversicherungen Objektschutzmassnahmen unterstützt haben, eine signifikant tiefere Schadenswahrscheinlichkeit. Demgegenüber führen grössere Hagelkörner und intensivere Niederschläge in fast allen Fällen zu einer grösseren Schadenswahrscheinlichkeit. Die Ergebnisse zur Wirkung der Massnahmen ist im Folgenden ausführlich erläutert.

3.4.1 Wirkung von Hagelschutzmassnahmen

In Abbildung 17 ist die Wirkung der Massnahmen gegen Hagelschaden visualisiert. Wir haben jene Massnahmen berücksichtigt, die von den KGV finanziell unterstützt wurden. In den allermeisten Fällen handelt es sich dabei um automatische Steuerungen der Storen, die dadurch rechtzeitig hochgezogen werden, wenn Hagel droht. In der Abbildung ist der Rückgang der bedingten Schadenswahrscheinlichkeit in Prozentpunkten bei Gebäuden mit Massnahmen im Vergleich zu Gebäuden ohne Massnahmen dargestellt. Die Resultate weisen darauf hin, dass Objektschutzmassnahmen die Schadenswahrscheinlichkeit bei kleiner und mittlerer Hagelgrösse deutlich reduzieren, jedoch bei Hagelgrösse von 4 cm und mehr die Wirkung nur noch geringfügig, jedenfalls nicht mehr statistisch relevant ist. Wahrscheinlich ist jedoch, dass,

auch wenn ein Schaden eintritt, der Schaden bei Objekten mit Massnahme kleiner ist als bei Gebäuden ohne Massnahme.

Die Ergebnisse legen nahe, dass die üblicherweise finanzierten Massnahmen gegen Hagel (z.B. das Einziehen von Storen) bei Hagel bis ca. 3 bis 4 cm Schäden vermeiden, aber dass diese Massnahmen bei grossen Hagelkörnern einen Schaden an anderen Teilen des Gebäudes nicht verhindern.



a. Kanton Aargau

b. Kanton Zürich

Abbildung 17 Rückgang der Schadenswahrscheinlichkeiten bei Hagel durch Massnahmen

Erläuterungen: Die Werte sind aus den geschätzten Koeffizienten der Logit-Regressionen berechnet. Die gestrichelten Linien geben das Konfidenzintervall an.

Im Anhang 8.2.3 (Abbildung 48) weisen wir aus, ob die ab 2012 verschärften SIA-Normen gegen Hagel wirksam sind. Die Daten für Aargau zeigen, dass Gebäude ab Baujahr 2012 eine leicht tiefere Schadenswahrscheinlichkeit aufweisen. Sie reduziert sich um 2.2 %-Punkte bei mittlerer Hagelgrösse von 3 cm. Im Kanton Zürich hingegen ist der Rückgang der Schadenswahrscheinlichkeit bei Gebäuden ab 2012 sehr klein.

3.4.2 Wirkung von Massnahmen gegen Überschwemmungen

Die Wirkung der Objektschutzmassnahmen gegen Überschwemmungen ist in Abhängigkeit der Niederschlagsintensität zu analysieren. Dabei ist zwischen der Niederschlagsdauer (gemessen anhand der Dauerstufen) und der Niederschlagsintensität (gemessen in Jährlichkeiten) in jeder Dauerstufe zu unterscheiden. Da es viele mögliche Kombinationen gibt, haben wir uns auf gewisse Ereignisse beschränkt. Für diese Ereignisse sind basierend auf den Ergebnissen der Logit-Regressionen die bedingten Schadenswahrscheinlichkeiten mit und ohne von den Gebäudeversicherungen unterstützten Massnahme ausgewiesen.

In der Tabelle 8 sind die Berechnungen für den Kanton Luzern dargestellt. Die Ergebnisse für Zürich finden sich im Anhang 8.2.4 in Tabelle 21, für Aargau in Tabelle 22. Die Daten für Luzern sind wie folgt zu interpretieren: Die hervorgehobenen Werte zeigen die bedingte Schadenswahrscheinlichkeit, dass ein Gebäude einen Schaden meldet, wenn für die Dauerstufe 1 h der Niederschlag eine Jährlichkeit zwischen 2 und 10 Jahren aufweist. Die Schadenswahrscheinlichkeit ist 13.5 %, wenn der Niederschlag bei allen anderen Dauerstufen bei einer Jährlichkeit kleiner 2 Jahre ist und keine Massnahmen vorliegen. Gemäss den Ergebnissen in Tabelle 15 waren 2021 etwa 9'500 Gebäude diesem Ereignis ausgesetzt. Liegt eine Massnahme vor, dann beträgt die Schadenswahrscheinlichkeit 7.9 %. Sind die Jährlichkeiten bei allen anderen Dauerstufen grösser als 2, dann ist die Wahrscheinlichkeit eines Schadens deutlich höher bei 28.0 % (ohne Massnahme) bzw. bei 17.9 % (mit Massnahme).

Tabelle 8: Massnahmen und Schadenswahrscheinlichkeiten durch Überschwemmung im Kanton Luzern

		Jährlichkeiten bei allen anderen Dauerstufen			
		Jährlichkeit < 2		Jährlichkeit >= 2	
Dauerstufe	**Jährlichkeit in Jahren**	**Ohne Massnahme**	**Mit Massnahme**	**Ohne Massnahme**	**Mit Massnahme**
1 Stunde	< 2	0.008	0.003	0.028	0.013
	2 bis < 10	**0.135**	**0.079**	**0.280**	**0.179**
	>=10	1.000	1.000	1.000	1.000
6 Stunden	< 2	0.008	0.003	0.180	0.108
	2 bis < 10	0.018	0.008	0.280	0.179
	10 bis < 30	0.202	0.124	0.742	0.643
	>=30	0.993	0.983	1.000	1.000
12 Stunden	< 2	0.008	0.003	0.233	0.145
	2 bis < 10	0.011	0.005	0.280	0.179
	10 bis < 30	0.043	0.021	0.501	0.371
	>= 30	0.377	0.255	0.909	0.837
24 Stunden	< 2	0.008	0.003	0.261	0.165
	2 bis < 10	0.009	0.004	0.280	0.179
	10 bis < 30	0.016	0.007	0.365	0.245
	>= 30	0.056	0.028	0.580	0.457
72 Stunden	0< 2	0.000	0.000	0.005	0.002
	2 bis < 10	0.000	0.000	0.004	0.002
	10 bis < 30	0.000	0.000	0.004	0.002
	>= 30	0.000	0.000	0.003	0.001

Erläuterungen: Die Werte zeigen die bedingten Schadenswahrscheinlichkeiten für unterschiedliche Niederschlagsereignisse. Die Werte sind aus den geschätzten Koeffizienten der Logit-Regressionen berechnet.

Die Resultate für Luzern, aber auch für die Kantone Zürich und Aargau zeigen die folgenden Gemeinsamkeiten:

– Gebäude mit Massnahmen haben in aller Regel eine tiefere Schadenswahrscheinlichkeit. Der Unterschied ist bei kleineren Jährlichkeiten meist grösser als bei hohen. So sind die Differenzen zwischen den Schadenswahrscheinlichkeiten bei den jeweils höchsten in der Tabelle ausgewiesen Jährlichkeiten klein. Zum Beispiel bei der Dauerstufe 6 bei Niederschlag mit einer Jährlichkeit von 30 und mehr Jahren (und bei allen anderen Dauerstufen einer Jährlichkeit von kleiner als 2 Jahre) reduziert sich die hohe Schadenswahrscheinlichkeit durch die Massnahme nur um 1 Prozentpunkt von 99 auf 98 %.
– Die Schadenswahrscheinlichkeiten sind bei langer Dauerstufe bei denselben Jährlichkeiten meist tiefer als bei kurzer Dauerstufe. Dies gilt für die Werte mit und ohne Massnahmen.

Diese Ergebnisse lassen zwei Interpretationen zu. Erstens ist zu vermuten, dass Objektschutzmassnahmen bis zu einer gewissen Niederschlagsintensität den Schaden verhindern, über dieser Schwelle keine Wirkung mehr hinsichtlich des Eintreffens eines Schadens zeigen. Möglich ist, dass der Schaden dennoch mit der Massnahme tiefer bleibt. Das haben wir mit der vorliegenden Methode nicht untersuchen können. Zweitens könnte die tiefere Schadenswahrscheinlichkeit bei langandauerndem Regen darauf hinweisen, dass Flächenschutzmassnahmen (Flussverbauungen, Rückhaltebecken) in diesen Niederschlagssituationen ihre Wirkung zeigen. Bei Starkniederschlag wirken diese Massnahmen allenfalls nur bedingt, da die Überschwemmungen durch Oberflächenwasser entstehen, welches über kleine Bäche, Rinnen und Mulden zu Überflutungen bei Gebäuden führt. Das könnte eine Erklärung sein, weshalb bei vergleichbaren Jährlichkeiten bei kurzen Dauerstufen häufiger Schäden entstehen als bei langen Dauerstufen.

3.5 Erkenntnisse

Das gewählte Analysekonzept hat sich in der vorliegenden Untersuchung der Schadensfälle durch Hagel und Überschwemmung in der Schweiz im Zeitraum 2005 bis 2021 bewährt. Mit der datenbasierten Analyse kann die Unwetterintensität (Hazard) den Gebäuden zugeordnet (Exposition) und die Wirkung objektbezogener Präventionsmassnahmen analysiert werden. Die Resultate legen folgende Interpretationen nahe:

– Die Unwetterschäden 2021 waren in den untersuchten Kantonen weitgehend durch Hagel und Starkniederschlag verursacht. Insbesondere im Kanton Luzern waren viele Gebäude (ca. 73'000) einer Hagelgrösse von 5 cm und mehr ausgesetzt. Viele dieser Gebäude erlitten hohe Schäden, möglicherweise vereint mit dem gleichzeitigen Starkniederschlag. Das führte zu hohen Gesamtschäden.
– Gleichzeitig führten Starkniederschläge zu beträchtlichen pluvialen Überschwemmungsschäden, während fluviale Überschwemmungsschäden im Vergleich zu 2005 klein blieben. Dabei spielten die weniger intensiven langanhaltenden Niederschläge eine Rolle, welche zu geringeren Abflusswerten an den Pegeln führte. Mit grosser Wahrscheinlichkeit haben aber auch Flächenschutzmassnahmen dazu beigetragen. Darauf weisen die teils niedrigen Schadenswahrscheinlichkeiten bei Niederschlag mit Dauerstufe 24 h und 72 h hin. Wie gross der relative Beitrag dieser beiden Effekte bei der Bewältigung des Unwetters 2021 war, können wir mit der vorliegenden Analyse nicht bestimmen.
– Die Ergebnisse legen nahe, dass die von den Gebäudeversicherungen unterstützten Objektschutzmassnahmen gegen Hagel und Überflutungen wirksam sind und die Schadenswahrscheinlichkeit deutlich reduzieren. Die Wirkung der Massnahmen nimmt jedoch ab, wenn die Unwetterintensität zunimmt und sie ist kleiner bei kurzzeitigem Starkniederschlag. Die Massnahmen gegen Hagel sind bis zu einer mittleren Hagelgrösse (von 3 bis 4 cm) wirksam. Es erstaunt daher, dass bei den im Detail untersuchten Gebäudeversicherungen bislang relativ wenige Massnahmen gegen Hagelschäden (im Vergleich zu den Massnahmen gegen Überschwemmungen) unterstützt wurden. Auch wäre angezeigt, Schutzmassnahmen gegen grosse Hagelkörner voranzutreiben.

Die vorliegende Untersuchung zeigt exemplarisch, welche detaillierten Ergebnisse aus dem umfassenden Datenbestand der Gebäudeversicherungen gewonnen werden können. Die Erschliessung dieses Datenschatzes erweist sich jedoch als sehr aufwändig. Mit einer systematischeren Datenerfassung liessen sich in Zukunft zeitnah differenzierte Analysen durchführen.

In der vorliegenden Analyse sind Massnahmen berücksichtigt, die finanziell von den Gebäudeversicherungen unterstützt wurden. Bei weiterführenden Arbeiten wäre es zweckmässig, die Präventionsmassnahmen stärker zu differenzieren. Die Ergebnisse der 9. Ausschreibung der Präventionsstiftung zu Wirkung und Nutzen von Massnahmen (Locher et al. 2017) geben Hinweise bezüglich der Wirksamkeit von verschiedenen Arten von Massnahmen. Mithilfe dieser Kategorisierung könnte die Wirkung unterschiedlicher Massnahmen präziser untersucht werden. Würden zudem die Kosten der Massnahmen systematisch und maschinell lesbar erfasst, wären präzise, gebäudegenaue Kosten-Nutzen-Analyse möglich. Im Anhang 8.2.1 finden sich einige konkrete Empfehlungen zur Verbesserung der Datenerfassung und Datenaufbereitung.

Um die Ergebnisse besser einschätzen zu können, vergleichen wir die Resultate mit ausgewählten Studien zum selben Thema. Unsere Analyse weist im Unterschied zur Nutzwertanalyse der 9. Ausschreibung (siehe Röthlisberger et al. 2017, S. 35) darauf hin, dass Objektschutzmassnahmen bei Hagel bis zu einer mittleren Hagelintensität wirksam sind und die Wahrscheinlichkeit eines Schadens reduzieren. Auch wenn hier die Kosten der Massnahmen nicht untersucht wurden, legen unsere Ergebnisse nahe, dass sich die Ergebnisse der Nutzwertanalyse der 9. Ausschreibung, bei der Hagelschutzmassnahmen nicht zu den bestbewerteten Präventionsmassnahmen zählen, verändern dürften und Hagelschutzmassnahmen eine höhere Priorität zukommen sollte.

Unsere Ergebnisse bestätigen die Resultate anderer Studien, dass Objektschutzmassnahmen gegen Überschwemmungen wirksam und wirtschaftlich sinnvoll sind. Im Unterschied zu Röthlisberger et al.

(2017) weisen wir die Wirksamkeit basierend auf Niederschlagsdaten nach. Dank der Differenzierung der Niederschläge nach Dauerstufen können wir das höhere Schadenspotenzial von Starkniederschlägen aufzeigen. Unsre Ergebnisse unterstützen die Erkenntnisse von Bubeck et al. (2012), dass private Massnahmen die Schadenshöhe bei nachfolgenden Überschwemmungen stark reduzieren. Ob sich bauliche Investitionen nur gegen häufig wiederkehrende Hochwassergefahren rechnen, wie Kreibich et al. (2011) für Überschwemmungen an der Donau und der Elbe nachwiesen, können wir nicht direkt bestätigen. Unsere Auswertungen zeigen, dass die Wirksamkeit im Sinne der Reduktion der Schadenswahrscheinlichkeit auch bei hoher Jährlichkeit vorhanden ist. Da wir die Kosten der Massnahmen nicht kennen, können wir über den wirtschaftlichen Nutzen keine Aussagen machen. Auf jeden Fall unterstützen die vorliegenden Ergebnisse die Aussage von Genovese und Thaler (2020), die in einem internationalen Review zum Schluss kommen, dass private Objektschutzmassnahmen zu einem effizienten Instrumentenmix der integrierten Hochwasservorsorge gehören, weil sie sich günstig mit anderen Elementen wie der "Awareness" oder behördlichen Flächen- bzw. Arealschutzmassnahmen politisch verbinden lassen.

4 Summarische Analyse Ahrtal

Die extremen Niederschläge im Juli 2021, die in verschiedenen Teilen Deutschlands und in den angrenzenden Niederlanden und Belgien zu grossflächigen Sturzfluten und Überschwemmungen führten, haben massive Schäden in der Grössenordnung von 33 Mrd. Euro verursacht. Mindestens 189 Menschen kamen in Deutschland ums Leben; mehr als bei jedem anderen Hochwasser in den letzten 60 Jahren. Obwohl der Anteil der versicherten Schäden wegen der geringen Versicherungsdichte in Deutschland gering war, verursachte «Bernd» dennoch die höchsten Versicherungsschäden in der Geschichte der deutschen Versicherungswirtschaft (GDV 2021).

Die meteorologische und hydrologische Einordnung des Sturmtiefs «Bernd» ist Gegenstand der meteorologischen Analyse in Abschnitt 2.3. In diesem Kapitel geht es um die Analyse der gesamtwirtschaftlichen und der versicherten Schäden im Ahrtal im nördlichen Rheinland-Pfalz (Deutschland), sowie um eine erste Einschätzung der Wirksamkeit von Prävention und Intervention bezogen auf das Sturmtief «Bernd». Neben einer umfassenden Literaturrecherche wurden schriftliche und mündliche Befragungen von Experten durchgeführt.

Dieses Kapitel ist wie folgt strukturiert: Das Unwetterereignis im Ahrtal wird in Kapitel 4.1 zunächst eingeordnet. Anschliessend wird eine lokale und regionale Schadensschätzung vorgenommen. In Kapitel 4.3 zeigen wir auf, wie die Versicherungswirtschaft das ausserordentliche Ereignis bewältigt hat. Das folgende Kapitel befasst sich mit der Wirksamkeit von Katastrophenvorsorge. Den Abschluss bildet die Ableitung genereller Erkenntnisse und deren Bedeutung für die Schweiz (Kapitel 4.5).

4.1 Ereignisdefinition

Im Zentrum dieses Berichts wie auch der öffentlichen Wahrnehmung der Flutkatastrophe in Deutschland steht das Ahrtal im nördlichen Rheinland-Pfalz (vgl. Abbildung 18). Hier werden die Umstände der Schadensentstehung und -bewältigung näher dargestellt.



Abbildung 18: Lage der Orte im Ahrtal
Quelle: CEDIM, KIT.

Das Ahrtal markiert den Verlauf der Ahr zwischen Antweiler und Heimersheim in der Eifel. Mit 89 km ist dieser Fluss eher kurz, und er hat mit 900 km^2 auch nicht gerade ein grosses Einzugsgebiet, aber er befand sich vollständig im Zentrum des Unwettergeschehens und der Überschwemmungen. Das hat mit der Besonderheit der Landschaft zu tun (Kron et al. 2022). Dazu zählen zum einen der geologische Untergrund, der überwiegend aus Schiefergestein besteht, welches die Versickerung behindert und den Untergrund fast wasserundurchlässig macht. Zu den Besonderheiten der Hügellandschaft des Ahrtals zählen die dicht besiedelten Talsohlen mit steilen Hängen, die mit Weinreben bepflanzt sind und über nahezu keine Bodenbedeckung verfügen. Diese «hydraulisch glatten» Flächen wirken beschleunigend für den Oberflächenabfluss aus Starkniederschlägen (DKKV 2022). Diese geomorphologischen Besonderheiten, das Fehlen von Rückhalteflächen und die versiegelten städtischen Flächen waren in der Verbindung mit den teilweise stark gesättigten Böden durch vorgängige Niederschläge die Hauptfaktoren für das Hochwasser. Der am 12.07.2021 einsetzende Regen brachte enorme zusätzliche Niederschläge, die bis zum 14.07.2021 auf einen Tagesniederschlag von 94,5 mm im Flächenmittel über das Flusseinzugsgebiet anstiegen (Junghänel et al. 2021). Zur Hochwasserkatastrophe trugen zusätzlich Verklausungen (Ansammlung von Treibgut) an Brücken bei. Von den 115 Brücken entlang der Ahr wurden 103 funktionsbeeinträchtigt oder zerstört. Bereits in den Jahren 1804 und 1910 ereigneten sich im Ahrtal verheerende Flutereignisse mit ähnlichen Wasserständen wie 2021 (Roggenkamp und Herget 2014). Dies zeigt klar, dass es sich bei dem Ereignis 2021 – auch in den am stärksten betroffenen Bereichen – um «ein seltenes, jedoch nicht einzigartiges Ereignis handelt» (Szönyi et al. 2022).

4.2 Lokale und regionale Schadensschätzung

Das Juli-Hochwasser 2021 hat grosse wirtschaftliche Schäden verursacht, zuvorderst aber Leid und Tod. Insgesamt verloren bei den Überflutungen 189 Menschen in fünf Bundesländern ihr Leben, zwei Personen gelten als vermisst. Vier Feuerwehrfrauen und -männer starben im Dienst, einer bei einer privaten Rettungsaktion. Auch von vier Selbstmorden wird in Folge des Ereignisses berichtet. Allein in Rheinland-Pfalz wurden rund 770 Menschen verletzt. Im Kreis Ahrweiler verloren 135 Menschen ihre Leben in der Katastrophe. Die meisten von ihnen (106) waren ältere Menschen über 60 Jahre; drei Kinder unter 14 Jahren starben (DKKV 2022).

In Rheinland-Pfalz wurden 65‘000 Personen und 3‘000 Unternehmen von der Flutkatastrophe wirtschaftlich geschädigt. Am stärksten betroffen war der Landkreis Ahrweiler mit 42‘000 Geschädigten. Fast 17‘000 Personen verloren dort ihr gesamtes Hab und Gut. 8‘800 Gebäude an der Ahr wurden zerstört oder so stark geschädigt, dass sie abgerissen werden mussten. 103 Brücken wurden allein im Ahrtal stark beschädigt oder komplett zerstört, 115 km Bahngleise und sieben Eisenbahnbrücken unterspült und damit unbenutzbar (DKKV 2022).

Der Gesamtschaden in Rheinland-Pfalz beläuft sich nach Schätzungen der deutschen Bundesregierung ((BMI/BMF 2022), S. 6) auf 18 Mrd. Euro, wovon 10 Mrd. Euro auf Privathaushalte und Wohnungsunternehmen entfallen, 7 Mrd. Euro auf Schäden an der öffentlichen Infrastruktur und 1,2 Mrd. auf Gewerbe inkl. Land- und Forstwirtschaft. Das Ahrtal ist eine wichtige Weinanbauregion in Deutschland. 65 Winzerbetriebe erlitten Zerstörungen und 10 % der Weinbauflächen im Ahrtal wurden vernichtet (Francke 2022).

Die starke Verklausung (siehe Abbildung 19) erwies sich als ein grosses Problem in der Interventionsphase. Feuerwachen, Polizei oder Krankenhäuser konnten von den Rettungskräften nur auf Umwegen erreicht werden. Zahlreiche Versorgungseinrichtungen wurden selbst Opfer von Überflutungen. 17 Schulen wurden zerstört, 19 Pflegeheime - davon 15 im Landkreis Ahrweiler - mussten evakuiert werden (DKKV 2022). Sechs Krankenhäuser und zwei Rehakliniken wurden überflutet; 36 Arztpraxen wurden völlig zerstört, 23 wurden nach der Flut aufgegeben (Francke 2022). Zahlreiche Impfzentren mussten wegen des Hochwassers geschlossen werden. Durch einen vollständigen Ausfall der Trinkwasser- und Stromversorgung in der Stadt Eschweiler bei Aachen mussten 300 Patientinnen und Patienten des St. Antonius-

Hospitals evakuiert werden; Intensivpatientinnen und Patienten wurden per Rettungshubschrauber vom Dach abgeholt, die anderen durch das Krankenhauspersonal in andere Kliniken gebracht (NÖS/dpa 2021).



Abbildung 19: Ansammlung von Treibgut (Verklausung) bei einer zerstörten Brücke im Ahrtal
Quelle: DLR 2021.

Der Notfall dient heute als Anschauungsbeispiel zur «Härtung» und für die Entwicklung von Notfallplänen in deutschen Krankenhäusern (Voss 2021). Noch bis zu 14 Tage nach der Flut waren 100 Tausende Menschen ohne Strom, Trinkwasser und Mobilfunkverbindung (RND/dpa 2021). Undichte Gasleitungen behinderten die Hilfsmassnahmen. Die Aufforderung zum Verlassen des Risikogebiets kam in einigen Fällen aufgrund dieser Störungen (zu) spät.

«Bernds» Platz in der Schadensstatistik

«Bernd» verursachte nach 2002, 2010, 2013 und 2016 den fünften Milliardenschaden in Deutschland im 21. Jahrhundert durch Überschwemmungen. Keines der drei vorangegangenen Ereignisse verursachte jedoch so viele Todesopfer, Verletzte und Gesamtschäden wie das Hochwasser 2021. Nur eine Katastrophe - ohne Einbezug von Hitzewellen und Kälteeinbrüchen - hat seit 1900 in Deutschland mehr Todesopfer gefordert: die Hamburger Sturmflut vom Februar 1962, bei der mindestens 347 Menschen starben.

Europaweit forderte «Bernd» wahrscheinlich 240 Menschenleben (Tote und Vermisste): 191 in Deutschland, 38 in Belgien und eines in Österreich. Belgien meldete einen geschätzten versicherten Schaden von 2,164 Mrd. Euro, was darauf schliessen lässt, dass dort mit Gesamtschäden in mindestens zwei- bis vierfacher Höhe gerechnet werden muss. Addiert man die Schadenzahlen aus allen anderen betroffenen Ländern, ergibt sich eine Gesamtsumme von 46 Mrd. Euro (Munich Re 2022).

Gekürzt aus: DKKV 2022, S. 83

4.3 Die versicherungswirtschaftliche Bewältigung der Schäden

Die Versicherungsdichte für Elementarschäden aus Naturgefahren ist in Deutschland regional sehr unterschiedlich zwischen ca. 30 % in den Hansestädten (Bremen und Hamburg) bis zu 94 % in Baden-Württemberg (siehe Abbildung 20).

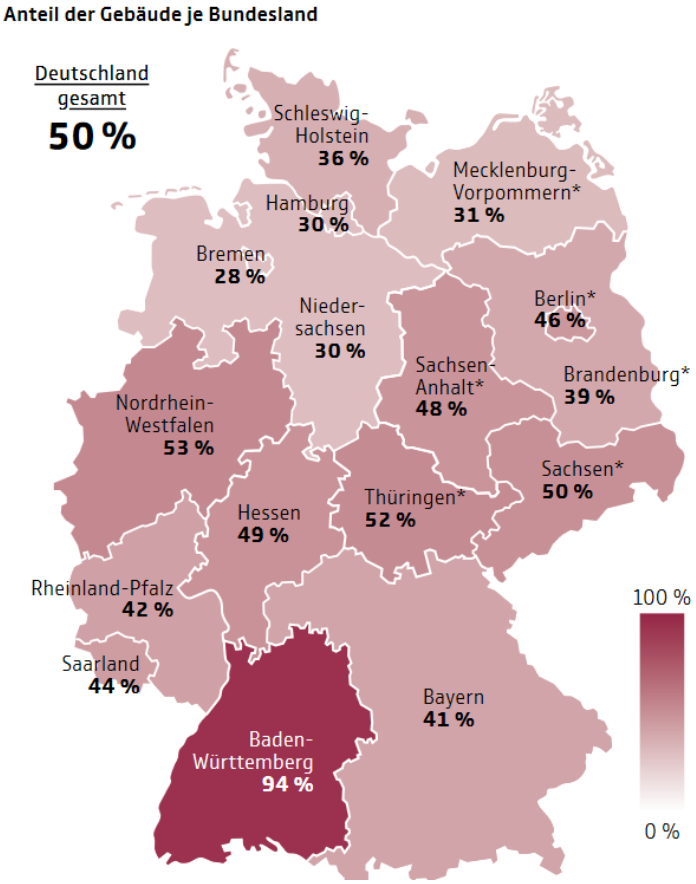


Abbildung 20: Versicherungsdichten mit sogenannten Altprodukten der ehemaligen Deutschen Versicherungs-AG.

Quelle: Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (GDV.DE, Schätzung Mai 2022.

Im Durchschnitt beträgt die Versicherungsdichte in Deutschland 50 %. Rheinland-Pfalz und das Ahrtal liegen deutlich unter dem Durchschnitt. Wegen der geringen Versicherungsdichte in Deutschland und wegen der unversicherbaren Infrastrukturschäden beträgt der Anteil der versicherten Schäden an den Gesamtschäden nur rund 11 Mrd. Euro (33 %; vgl. Munich Re 2022). In Rheinland-Pfalz ergab eine Befragung, dass sogar nur 24 % der Gesamtschäden von 18 Mrd. Euro versichert waren. Im Bereich der privaten Gebäudeversicherung ist der hohe Grad der Unterversicherung in Rheinland-Pfalz eine Folge der Aufhebung der Pflichtversicherung durch die EU-Richtlinie zur Liberalisierung der Finanzmärkte. Vor 1994 gab es ähnlich hohe Versicherungsdichten (> 90 %) wie heute noch in Baden-Württemberg. In dem von uns durchgeführten Interview mit der VZ-RLP wurde dies darauf zurückgeführt, dass die Preissteigerungen seit der Marktliberalisierung von bis zu 500 % (von 100 Euro p.a. auf 500 Euro p.a.) viele Versicherungsnehmende abgeschreckt habe. Vielen sei die Tatsache des Ausschlusses der Elementarrisiken aus der allgemeinen Feuerversicherung im Übrigen bis heute noch nicht ganz klar. Diese wissenschaftlich belegte «Versicherungsillusion» (Osberghaus und Philippi 2016) hat jetzt frappierende Folgen für die Betroffenen, denn die 8‘800 geschädigten Gebäude im Ahrtal wiesen einen besonders hoher Schädigungsgrad von im Durchschnitt 210‘000 Euro pro Gebäude auf.

In der Folge des Flutgeschehens an der Ahr berichtete der GDV von einer raschen Zunahme der Versicherungsabschlüsse. Allein im dritten Quartal 2021 stieg die Zahl der Neuabschlüsse auf 400‘000 in Deutschland. Sie fiel aber schon im ersten Quartal 2022 wieder auf 125.000 zurück (GDV 2022). Die Unterversicherung im Bereich der Flutgefahren bleibt ein anhaltendes allgemeines Lebensrisiko in Deutschland,

denn Starkregenereignisse betreffen praktisch alle Regionen und damit alle Bürgerinnen und Bürger des Landes im nahezu gleichen Masse (Toller 2017), S. 3 und 4).

4.4 Aufzeigen Katastrophenvorsorge

Deutschland hat einen über viele Jahrzehnte entwickelten sicherheitstechnischen und organisatorischen Apparat, um mit Überschwemmungen, auch mit grösseren, sicher und routiniert umzugehen. Aufgrund der guten Bewältigung der Hochwasser in der Vergangenheit entsteht – wie unsere Vergleichsstudie zeigt – manchmal das Gefühl, bereits «alles Nötige und Mögliche getan zu haben». Dies führt zu Problemen bei seltenen, extremen Niederschlagsereignissen wie dem Sturmtief «Bernd». Bei der Katastrophenvorsorge unterscheiden wir kategorisch zwischen lokalen, kurzfristigen Niederschlägen mit *pluvialen* Folgeüberschwemmungen teils hoher Intensität (Sturzfluten) auf der einen Seite und grossflächigen, langanhaltenden *fluvialen* Überschwemmungen (Flusshochwasser). Der Unterschied zeigt sich vor allem in der Interventionslage: Bei Sturzfluten werden Einsatzkräfte schnell vor Ort benötigt, die kaum Zeit haben, ihren Einsatz technisch und organisatorisch vorzubereiten. Das verlangt ein hohes Mass an Flexibilität und vorausschauendes Üben solcher Situationen. Kurze Vorwarnzeiten sind keine Panne, sondern die Regel und müssen Rahmenbedingung der Einsatzübungen sein. Im Gegensatz dazu kann bei einem «klassischen» Flusshochwasser häufig noch mit der detaillierten Vorbereitung der Einsatzstrategie begonnen werden, weil die Vorlaufzeit einen oder mehrere Tage beträgt. Überschwemmungen können aber auch eine Mischung aus beiden Arten von Ereignissen sein. Das Hochwasser von 2021 war das Ergebnis eines solchen kombinierten pluvialen und fluvialen Ereignisses. Der Schadensschwerpunkt und die Defizite lagen eindeutig im Bereich des pluvialen Flutgeschehens an der Ahr.

Eine sorgfältige Analyse der Schadensursachen des Deutschen Komitee Katastrophenvorsorge (DKKV 2022), S. 51) zeigt, dass folgende zehn Faktoren ausschlaggebend für die Ahrtal-Katastrophe waren:

1. Extreme Niederschläge, sowohl in Bezug auf die Gesamtmenge als auch auf die Intensität (gemessen wurden bis zu 33 mm/h), im Zusammenhang mit einer quasistationären Wetterlage in Europa;
2. Geringes Rückhaltevermögen in den Einzugsgebieten aufgrund der vorherrschenden feuchten Bedingungen und der geomorphologischen Gegebenheiten;
3. Sehr schneller Oberflächenabfluss, kurze Konzentrationszeiten und reissender Abfluss in den Wasserläufen aufgrund des steilen Gefälles in den betroffenen Regionen;
4. Schnell ansteigende Wasserstände und rasch zunehmende Fliessgeschwindigkeiten, die durch die Verklausung von Brücken und andere Strömungshindernisse erhöht wurden;
5. Das Wasser, das mehrere Meter hoch selbst durch weit vom Fluss entfernte, niedrig gelegene Gebiete strömte, nachdem es über die Ufer getreten war, stellte eine grosse Gefahr für Menschen dar und entwickelte eine immense Zerstörungskraft für Gebäude und andere Strukturen;
6. Beschädigung von Bauwerken (z.B. Gebäude, Brücken) durch den Aufprall grosser Objekte wie Baumstämme, Fahrzeuge und anderes Treibgut;
7. Erosion von Ufern, Auskolkung, Unterspülung von Bauwerken und Sedimentablagerungen (Geröll, Schlamm);
8. Probleme und Verzögerungen bei der Warnung und Evakuierung;
9. Gefahrenkarten, die die tatsächliche Situation nur unzureichend widerspiegelten;
10. Der Überraschungseffekt in Verbindung mit dem mangelnden Vorstellungsvermögen der Menschen, dass ein solches Ereignis tatsächlich eintreten würde.

Besonders die letztgenannten drei Faktoren werden die Politik und die Gerichte in Deutschland nach der Ahrtal-Katastrophe noch lange beschäftigen. Dabei geht es um das menschliche Versagen Einzelner, aber auch eine grundlegende Überprüfung und Verbesserung von Frühwarnsystemen in Bezug auf Starkregen und Sturzflutereignisse. Es ist offensichtlich, dass die Gefahr, die vom Tief «Bernd» ausging, in den Gefahrenschwerpunkten unterschätzt wurde, wo das Tief quasi-stationär «stand» und «eingebettete Niederschlagszellen» entwickelte, vergleichbar mit einem Dauergewitter. Die höchste Warnstufe 4 wurde vom

Deutschen Wetterdienst (DWD) zwar rechtzeitig ausgegeben, aber die Dringlichkeit dieser Information ging auf dem Weg zu den politischen Entscheidungstragenden und Betroffenen teilweise verloren. Manche Katastrophenmanager bezweifelten die Glaubwürdigkeit der vorhergesagten Fluthöhen, wie die Aussagen vor der Untersuchungskommission des Landtags von Rheinland-Pfalz belegen (Weidinger 2022). Die schrecklichen Schicksale in den überschwemmten Häusern, Pflegeheimen und in den Strassen des Ahrtals zeigen, dass diese Warnungen die Menschen nicht erreicht haben, wobei individuelles Fehlverhalten nach dem Erhalt der Warnungen sicherlich auch ein Faktor war.

Eigentlich nötige Evakuierungen erfolgten nicht oder zu spät, weil die Gefahren- und Risikokarten für das Ahrtal nicht auf dem neuesten Stand waren. Fehlende Hinweise auf frühere Ereignisse (1804, 1910) und in Vergessenheit geratene Flutmarken («Ankerbeispiele») erschwerten die Bewertung der Gefahren. So fehlten teilweise Angaben über den Zeitpunkt, zu dem eine Hochwasserwelle aus dem Einzugsgebiet eintreffen wird (die sog. «Konzentrationszeit») und die Fliessgeschwindigkeiten in den Karten bestimmter Gebiete (Rodenkirch 2022). Ungenaue Karten können zu gravierenden Fehlentscheidungen bei der Intervention führen, besonders wenn die Zeitspanne vom Niederschlag bis zur Überflutung kurz ist - wie bei Starkregen und Sturzfluten. Denn das Wissen und die Risikowahrnehmung von Institutionen und der Bevölkerung sind entscheidend dafür, ob und wie schnell Notfallmassnahmen unternommen und umgesetzt werden. Aktuelle Umfragen in Deutschland zeigen, dass das Verständnis von Warnstufen und Risikokarten in der Bevölkerung jedenfalls bei Starkregen und Sturzfluten schwach ausgeprägt ist (mdr WISSEN 2022). Nur aber wer richtig reagiert, kann die Folgen für seine Gesundheit und zu schützende Objekte mindern. Innovative technische Warnmittel können die bestehenden Aufklärungs- und Informationskampagnen hier ergänzen. Warnungen mit Vorhersagen von potenziellen Auswirkungen auf Gebäude und kritische Infrastrukturkomponenten haben ein grosses Potenzial, die Reaktion im Ereignisfall zu verbessern (DKKV 2022), S. 53). Bessere Hochwasservorhersagemodelle müssen um diese Modellkomponenten erweitert werden und nicht nur die überfluteten Gebiete, sondern auch mögliche Folgen (Gefahren für Leben, Gesundheit und Schäden) aufzeigen, wie im «Fallbeispiel Valley/Oberbayern» zu dieser Studie aufgezeigt wird.

4.5 Generelle Erkenntnisse

Aus diesen Befunden ergeben sich allgemeine Erkenntnisse in den drei folgenden Bereichen:

Bauvorsorge und Raumplanung

Sturzfluten lassen sich nicht vermeiden, aber durch hochwasserangepasste und hochwasserresistente Bauten und einen dauerhaften baulichen Schutz können die Schäden an Gebäuden vermindert werden. Nach dem Ahrtal-Ereignis gilt mehr denn je: Bei der Planung neuer Brücken muss das Thema Schutt und Treibgut im Hochwasser stärker berücksichtigt werden. Dieser Gefahr kann durch grössere Brückendurchlässe entgegengewirkt werden. Nach Möglichkeit sollte aber eine Konstruktion gewählt werden, die extremen Ereignissen standhält. Das bedeutet, dass die Brücke nicht nur den physikalischen Belastungen während eines Hochwassers standhalten sollte, sondern dass das Wasser auch bei blockierten Durchlässen ohne erheblichen Rückstau und ohne Uferabbrüche an der Brücke vorbeifliessen können sollte. Um dies sicherzustellen, sind die Zufahrtsrampen so zu konzipieren, dass sie ohne Erosion überströmt werden können. Schliesslich muss die Brücke unmittelbar nach dem Zurückgehen des Hochwassers wieder benutzbar sein, im Idealfall ohne grössere oder gar keine Beschädigungen. Eine hochwasserangepasste Flächennutzungsplanung sorgt dafür, dass Fliesswege und Überschwemmungsgebiete, die bei extremen Hochwasserereignissen zum Einsatz kommen, von Wohnhäusern und anderen Infrastrukturen wie Strassen, Bahngleisen und Brückenzugängen sowie von Bepflanzungen freigehalten werden. Um Schäden zu vermeiden, sollte man darauf verzichten, in besonders Hochwasser-exponierten Lagen wie inneren Bögen (Beispiel: Ahrschleife in Schuld) oder brückennahen überschwemmungsgefährdeten Räumen zu bauen. Im Hinblick auf den Wiederaufbau bei Hochwasser kann dies im Einzelfall auch den Abbruch und die Verlegung von Gebäuden bedeuten. Die gesetzlichen Regelungen in Deutschland sind zu schwach, wenn es

um die Errichtung von Gebäuden in einer Hochwassergefahrenzone geht. In der Schweiz zum Beispiel ist das Bauen in einer «roten Zone» strikt verboten. «Schwammstädte» mit weniger versiegelten Flächen, mehr Parks und begrünten Dächern können das Wasser speichern und so nicht nur den Wasserabfluss aus der Stadt reduzieren, sondern gleichzeitig das Stadtklima durch ihren positiven Einfluss auf Luftfeuchtigkeit, Luftqualität und Temperatur verbessern.

Frühwarnung und Verhalten

Frühzeitige und effektive Information und Vorsorge sind im Notfall von entscheidender Bedeutung. Die hohe Zahl der Todesopfer in der Ahr-Katastrophe darf sich nicht wiederholen! Die lediglich meteorologische Vorhersage muss in eine konkrete Gefahrenvorhersage (unter Berücksichtigung möglicher Folgen) übersetzt und mit konkreten Handlungsanweisungen versehen werden. Nur so können Gemeinden, Bürgerinnen und Bürger diese verstehen und in die Handlungen umsetzen. Ein derartiges Warnsystem muss über genügend Redundanzen verfügen, also auch über Personal und Medien, die nicht auf das Leitungsnetz angewiesen sind. Seine Struktur sollte auf regionale Bedürfnisse abgestimmt sein. Lokale Gegebenheiten und mögliche lokale Effekte müssen berücksichtigt werden. Die Zielgruppen (Bevölkerung und die Akteure des Katastrophenschutzes) müssen über Risiken aufgeklärt, informiert und geschult werden. Dies kann durch Bildung, Fernsehwerbung, Broschüren und Schnellkurse zum Risikohandeln geschehen. Zum einem breiten Risikowissen gehören die Kenntnis von Gefahrenkarten und Notfallplänen sowie das Ein-Mal-Eins, wie man sich als Einzelner in Gefahrensituation richtig verhält, zwingend dazu. Japan kann uns diesbezüglich ein Beispiel sein (Gavari-Starkie et al. 2021).

Versicherungen und Wiederaufbau

Nach jeder grösseren Überschwemmung gibt es die Diskussion in Deutschland über die Einführung einer Pflichtversicherung für Hochwasser - ein Modell, das der GDV nicht unterstützt. Der Verband schlägt stattdessen eine Lösung vor, bei der die Elementarschadenversicherung automatisch in zukünftige Verträge aufgenommen wird, aber mit einer Ausstiegsklausel ausgestattet wird. Das heisst, Kunden müssen sich aktiv gegen die Versicherung entscheiden, wenn sie dies wünschen. Der GDV verbindet diese Neuerung mit der Forderung nach strengeren gesetzlichen Beschränkungen für den Bau von Gebäuden in überschwemmungsgefährdeten Gebieten, Vorschriften für hochwassersicheres Bauen in Risikogebieten und Anstrengungen zu Klimaanpassungsmassnahmen seitens der deutschen Bundesregierung. Nach der Ahrtal-Katastrophe forderten im Juni 2022 die Bundesländer mehrheitlich eine Pflichtversicherung gegen Elementarschäden. Die deutsche Bundesregierung prüft seither diesen Vorschlag – allerdings bislang ohne Ergebnis.

Für die Schweiz bedeutsamer sind die Erfahrungen beim Wiederaufbau im Ahrtal. Diskussionen über die Gestaltung des Wiederaufbaus begannen bereits kurz nach der Flutkatastrophe. Ein Wiederaufbau, der das vergangene Ereignis und die Lehren daraus nicht berücksichtigt, so die übereinstimmende Meinung, würde zukünftig erneut zu gravierenden Schäden führen. Der Wiederaufbau sollte stattdessen als Chance für eine resiliente Transformation unter dem Aspekt «Build Back Better» genutzt werden, was auch bedeuten kann, dass an manchen Stellen gar nicht wieder aufgebaut werden sollte. Die «Build Back Better»-Planung kostet allerdings Zeit und gerät in den Konflikt mit schneller Erholung der Regionen. Die Menschen brauchen so schnell wie möglich ein Dach über dem Kopf und eine funktionierende öffentliche Infrastruktur. Nach einer Eilentscheidung der Landesregierung von Rheinland-Pfalz vom 1.10.2021 dürfen alle Häuser bis auf 34 an ihrem angestammten Standort im Ahrtal wieder aufgebaut werden. (SWR Aktuell, 01.10.2021). Die Verkehrs-, Strom-, Wasser- und Abwasser-, Gas- und Telekommunikationsinfrastrukturen der Region konnten in einer Mammutanstrengung schon bis Jahresende 2021 wiederhergestellt werden (Landesregierung Rheinland-Pfalz 2022b). Dieses gewaltige Wiederaufbauprogramm wurde nur durch den gravierenden Mangel an professionellen Bauunternehmen, Handwerksbetrieben, qualifizierten Fachkräften und vor allem an Baumaterial im Gefolge der Pandemie in Einzelelementen ausgebremst (Landesregierung Rheinland-Pfalz 2022a). Für einen nachhaltigen und resilienten Wiederaufbau braucht

es daher vorsorgende Bau-, Stadt- und Regionalplanung auf allen Ebenen. Hier sind neben einer wissenschaftlichen Begleitung auch interkommunaler Austausch und Kooperation notwendig. Ein Programm von lokalen Bürgerdialogen verknüpft die kurz-, mittel- und langfristigen Ziele im Rahmen des Wiederaufbaus. Das Ziel dieser Bürgerdialoge ist ein überörtliches Hochwasservorsorgekonzept, das das komplette Gebiet der Ahr von der Quelle bis zur Mündung erfasst. Ein wichtiger Schritt auf diesem Weg sind kommunale Kooperationsvereinbarungen in der «Hochwasserpartnerschaft Ahr» (Steingass 2022).

Die Hochwasserkatastrophe vom Juli 2021 hat damit gezeigt, dass alle Komponenten des Leistungsdreiecks der kantonalen Gebäudeversicherer – Prävention, Intervention und Versicherung – im Lichte der Erfahrungen in Deutschland wenigstens noch einmal durchdacht werden müssen - insbesondere im Hinblick auf Starkregen und Sturzfluten. Denn bei Letzteren stehen erkennbar andere Massnahmen im Mittelpunkt als bei Flussüberschwemmungen.

5 Summarische Analyse Ostalpenraum

In diesem Kapitel wird beschrieben, welche Unwetterschäden das Tief «Bernd» im Juli 2021 im Alpenvorland verursacht hat. Für die Ableitung von Erkenntnissen bezüglich Prävention und Intervention für die Schweiz wurden die Gebiete Oberbayern, Salzburg und Tirol genauer untersucht. Neben einer umfassenden Literaturrecherche wurden sechs Expertengespräche geführt. Die Unwetterereignisse im Alpenvorland werden in Kapitel 5.1 zunächst eingeordnet. Anschliessend wird eine lokale und regionale Schadensschätzung für die Einzugsgebiete vorgenommen (Kapitel 5.2). In Kapitel 5.3 werden Hagelereignisse, welche im Sommer 2021 aufgetreten sind, beschrieben. Das folgende Kapitel befasst sich mit der Wirksamkeit von Katastrophenvorsorge (Kapitel 5.4). Den Abschluss bildet die Ableitung genereller Erkenntnisse.

5.1 Ereignisdefinition

Einen Überblick über die vom Unwetter «Bernd» betroffenen Gebiete in Oberbayern, Salzburg und Tirol bietet die folgende Karte (Abbildung 21).

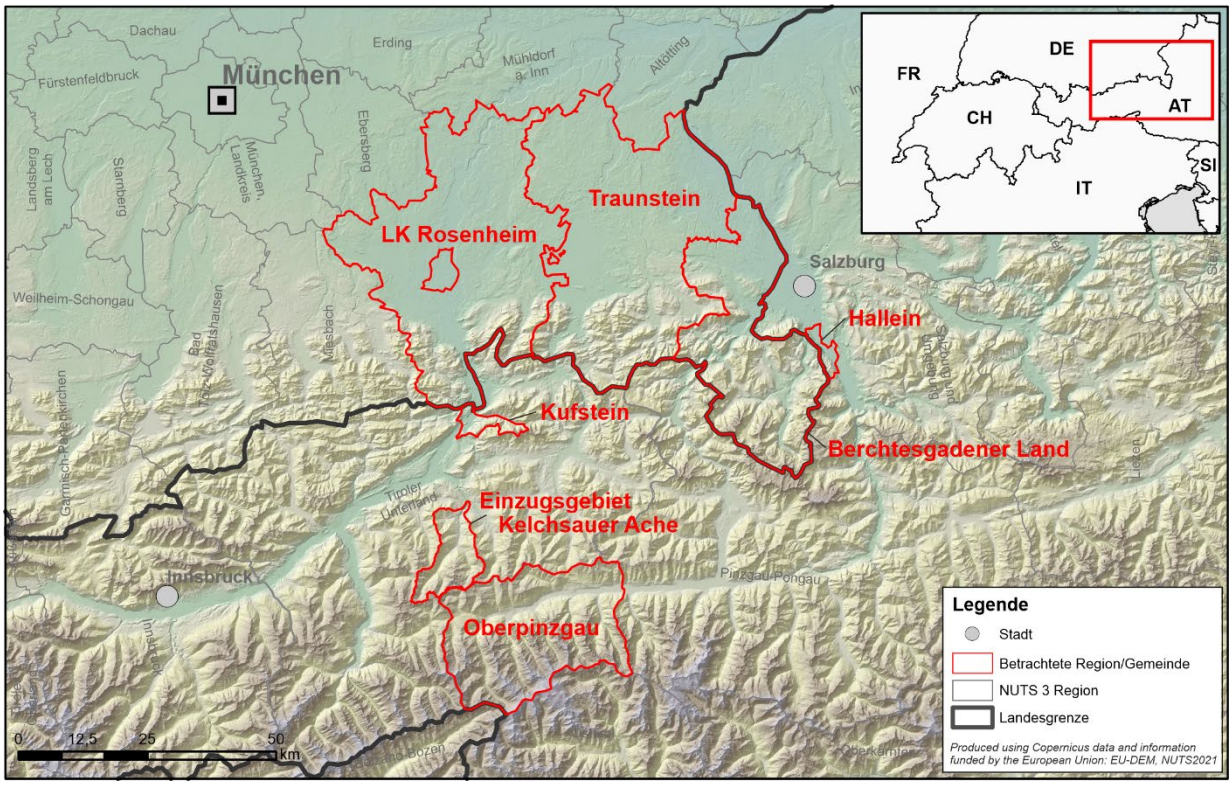


Abbildung 21: Von «Bernd» betroffene Gebiete in Oberbayern, Salzburg und Tirol.

Am Abend des 17. Juli 2021 wurden zahlreiche Orte in den Landkreisen Rosenheim, Traunstein und im Berchtesgadener Land nach starken Regenfällen überflutet. Der Gefahrenschwerpunkt lag im Berchtesgadener Land mit den Gemeinden Berchtesgaden, Bischofswiesen, Schönau am Königssee, Marktschellenberg und Ramsau. Hier wurde der Katastrophenfall ausgerufen, nachdem die Berchtesgadener Ache auf 3,50 Meter angestiegen war, was den bisherigen Höchststand von 3,12 Metern im Jahr 2012 deutlich übertroffen hat. Der Bahnhof von Bischofswiesen wurde überflutet, die Kunsteisbahn Königssee mit der Bobbahn schwer durch das Hochwasser und Geröllmassen beschädigt. Da eine Hangrutschung in Schönau am Königssee befürchtet wurde, kam es dort zu Evakuierungen. Im Landkreis Rosenheim stieg der Innpegel an mehreren Orten (Oberaudorf, Rosenheim und Wasserburg) auf Werte der Meldestufe 1 bis 2, damit wurden nicht so kritische Werte wie im Berchtesgadener Land erreicht.

Das Tiefdruckgebiet «Bernd» hat in Salzburg im Wesentlichen zwei Ereignisse verursacht. Im Oberpinzgau haben grosse und sehr lang anhaltende Niederschlagsmengen, dazu geführt, dass die Schutzinfrastruktur stellenweise überfordert beziehungsweise sehr knapp vor der Überforderung war. Hohe Temperaturen auf der Höhe und kein bzw. wenig Schnee auf den Gletschern der Tauerntäler hat die Dynamik im Salzachtal zusätzlich verstärkt. Aufgrund von vorangegangenen Ereignissen 2005 und 2014 waren sämtliche Hochwasserschutzmassnahmen bereits umgesetzt und die Region galt als «gerüstet» für extreme Wetterereignisse. Am 18.07.2021 wurde bei Einsatz der Hubbrücke automatisch der Zivilschutzalarm ausgelöst mit dem Hinweis tieferliegende Räume zu meiden. Es handelte sich um ein HQ 300 Ereignis. In der Gemeinde Hallein trat zeitgleich ein lokal begrenztes Ereignis am Wildbach Kothbach auf. Das Ereignis entstand durch den Niederschlag einer einzigen Gewitterzelle aus dem Berchtesgadener Land in Oberbayern. Durch Sekundäreffekte, wie zum Beispiel parkende Fahrzeuge, traten unerwartete Verklausungen auf, die zu Überschwemmungen im Altstadtbereich führten. Ein ähnliches Ereignis trat bereits in den 1970er Jahren auf. Deshalb waren die Risikobereiche bei Ereigniseintritt zwar bekannt, allerdings waren sie in Vergessenheit geraten.

Für Tirol zählt das Unwetter «Bernd» nicht zu den aussergewöhnlichen grossflächigen Ereignissen. Im Ereigniszeitraum wurden dennoch innerhalb von 17 Stunden an 15 Messstationen mehr als 100 Millimeter Niederschlag gemessen. Zu den am meisten betroffenen Gebieten im Betreuungsbereich der Bundeswasserbauverwaltung zählt die Stadt Kufstein, in der drei Stadtbäche, welche teilweise verrohrt sind, über die Ufer getreten sind. Daneben kam es zu Uferanrissen entlang der Kelchsauer Ache. In der Gemeinde Hopfgarten i.Br. wurde eine Brücke zerstört, wodurch das Tal zeitweise abgeschnitten war.

5.2 Lokale und regionale Schadensschätzung

Für die Bewältigung von Hochwasser- und anderen Elementarschäden finden sich in Deutschland und Österreich andere Risikotransfersysteme als in der Schweiz (Tabelle 9). Deshalb liegen Schadensdaten für die summarischen Analyse unterschiedlich aufgeschlüsselt vor. Für Oberbayern werden die Schadenswerte aus dem Zwischenbericht der deutschen Bundesregierung vom 27.9.2021 sowie Berichten in den lokalen Medien zugrunde gelegt. Für Salzburg und Tirol werden vorläufige Zahlen des Katastrophenfonds, der Österreichern Hagelversicherung sowie Schäden an der Infrastruktur des Flussbaus aufgeschlüsselt. Solange eine Deckung vorhanden ist, können in Österreich bis zu 50 % der entstandenen Schäden durch den Katastrophenfonds gedeckt werden.

Tabelle 9: Risikotransfersysteme in der Schweiz, Deutschland und Österreich.

Schweiz	Deutschland	Österreich
Pflichtversicherung mit integrierter Prävention	reine Marktlösung mit ergänzender staatlicher Notfallhilfe	steuerfinanzierter Katastrophenfonds mit ergänzenden Marktangeboten

Quelle: Raschky et al. 2009.

Die Schäden in Bayern werden auf 298 Mio. Euro geschätzt (BMI/BMF, 2022). Der grösste Teil der Schäden (135 Mio. Euro) entfällt auf die öffentliche Infrastruktur (Brücken, Strassen und Kanalisation). Weitere grosse Schäden entstanden bei privaten Haushalten (90 Mio. Euro) und Unternehmen (73 Mio. Euro). Eine bemerkenswerte Häufung von Schäden gab es in Oberbayern bei Gewässern dritter Ordnung mit wildbachtypischen Eigenschaften wie hohem Gefälle, schwankendem, teilweise starkem Abfluss und streckenweise hoher Feststoffführung. An den Wildbächen entstanden in den Beobachtungsregionen Schäden in Höhe von 2,5 Mio. Euro; 85 % aller Gewässer dieser Klasse wiesen nach dem Starkregenereignis im Juli 2021 reparaturbedürftige Schäden auf. Der Schadensschwerpunkt lag im Berchtesgadener Land (Merkur 2021). Hier summieren sich die Schäden von «Bernd» auf 116,6 Mio. Euro. Davon entfielen

86 Mio. Euro auf öffentliche Infrastrukturen, 12 Mio. Euro auf private Haushalte und 11 Mio. Euro auf Unternehmen. Der Rest waren Schäden in der Land- und Forstwirtschaft. Bemerkenswert ist hier der hohe Schadensanteil bei Forstwegen, Brücken und Zufahrten von rund 2 Mio. Euro.

Das Hochwasser im Oberpinzgau hat 2021 etwa 70-90 Gebäude beschädigt. Dabei sind 25-30 Mio. Euro Gesamtschaden entstanden. Im Vergleich dazu waren im Jahr 2005 800-900 Gebäude betroffen. Es entstand ein Gesamtschaden von 150 Mio. Euro. Bei dem Unwetter 2014 entstand ein Gesamtschaden von 25 Mio. Euro, wobei es sich um das «kleinste» der drei Ereignisse im Oberpinzgau handelte. Im Juli 2021 wurde das Gewerbegebiet West in Mittersill zur Gänze überströmt und konnte nur noch teilweise evakuiert werden, weitere Schutzinfrastruktur konnte Schäden abwenden. So war zum Beispiel die Hubbrücke Mittersill in Betrieb. In weiterer Folge waren alle Retentionsbereiche inklusive Reservebecken bis auf die letzten Zentimeter gefüllt. Darstellungen des Wasserbaus zeigen sämtliche gefüllte Retentionsbereiche mit insgesamt 20 Mio. m³ Wasser im gesamten Bereich des Oberpinzgaus. In der Landwirtschaft wurden massive Schäden verzeichnet. Flächen in einer Dimension von etwa 1'200 Hektar wurden verwüstet. Zudem kam es zu dramatischen Schäden an Infrastrukturanlagen durch Murereignisse. Am Kothbach hingegen waren die Schäden an Gebäuden enorm. Etwa 300 Gebäude waren von den Überflutungen betroffen, rund 220 Anträge zur Schadensregulierung wurden an den Katastrophenfonds gestellt. Es entstanden private Schäden von rund 10 Mio. Euro gesamt. Das Land Salzburg beziffert den Gesamtschaden des Juli-Hochwassers 2021 mit 30,6 Mio. Euro. Neben 388 Wohngebäuden (rund 12 Mio. Euro) wurden 73 Firmen (rund 11 Mio. Euro), 2'200 Hektar landwirtschaftliche Fläche (rund 5,6 Mio. Euro) sowie ländliche Infrastruktur (rund 2 Mio. Euro) beschädigt. Nicht enthalten sind Schäden an der Infrastruktur der Gemeinden, des Landes und des Bundes. Dazu zählen beispielsweise Schäden an der Pinzgauer Lokalbahn, Gemeinde- und Landesstrassen und kommunale Gebäude (Salzburger Landeskorrespondenz 05.08.2021).

Das Unwetterereignis im Juli 2021 in Tirol ist nicht vergleichbar mit dem vorangegangenen Ereignis im Jahr 2005. Verglichen mit diesem Jahr war es ein sehr viel «kleineres» Ereignis. Es sind Schäden an der Infrastruktur des Wasserbaus entstanden. In Kufstein beliefen sich diese auf rund 800'000 Euro, an der Kelchsauer Ache waren es 2,1 Mio. Euro. Ein grosser Teil entstand im Zusammenhang mit der zerstörten Brücke in Hopfgarten i.Br. An der Kelchsauer Ache waren Verkehrswege temporär nicht befahrbar, wodurch das Tal abgeschnitten wurde. Durch eine Behelfsbrücke konnte die Verbindung übergangsweise wiederhergestellt werden. Von der anderen Talseite war der Verkehrsweg nicht blockiert. Personen waren bei den beiden Ereignissen (2021) in Tirol nicht betroffen. Ein vorläufiger Bericht der Stadt Kufstein, der bei einer Gemeinderatssitzung im September 2021 diskutiert wurde, beziffert die Schäden an öffentlicher Infrastruktur und deren Behebung mit 2,46 Mio. Euro (Stadt Kufstein 2021).

5.3 Hagel in Österreich und Süddeutschland im Juni und Juli 2021

In Österreich und Süddeutschland traten im Sommer 2021 einige mittlere und grössere Hagelereignisse auf (Abbildung 22). In Süddeutschland wurden im Zeitraum 19.6.-15.8.2021 mindestens fünf Hagelzüge vermeldet (Südkurier 2021). In Baden-Württemberg gab es Hagel-Unwetterwarnungen am 23. Juni und am 15. August des Jahres, in Bayern am 22. Juni und 25. Juli (Schwäbische Zeitung 2021). Die Schäden in Bayern beliefen sich auf «deutlich über 100 Millionen Euro» allein in Bad Tölz-Wolfratshausen (Passauer Neue Presse 2021), die Schäden in Baden-Württemberg werden auf insgesamt 1,4 Mrd. Euro im Jahr 2021 geschätzt, wovon 900 Mio. Euro durch die Sachversicherer für Schäden an Häusern und Hausrat, Gewerbe- und in Industriebetrieben getragen wurden und 500 Mio. durch die Kfz-Versicherer (Cuprakowa 2022) 2021 stellt damit das «Jahr mit dem höchsten Unwetterschäden in der Geschichte der Versicherungswirtschaft» dar (GDV 2021).

Für das Tief «Bernd» wurde in sieben von neun Österreichischen Bundesländern die Unwetterwarnung «Gewitter und Hagel» ausgegeben. Durch feuchte Luft und schwache Winde wurde die Bildung von Hagel jedoch weitgehend unterdrückt (Stangl 2022).

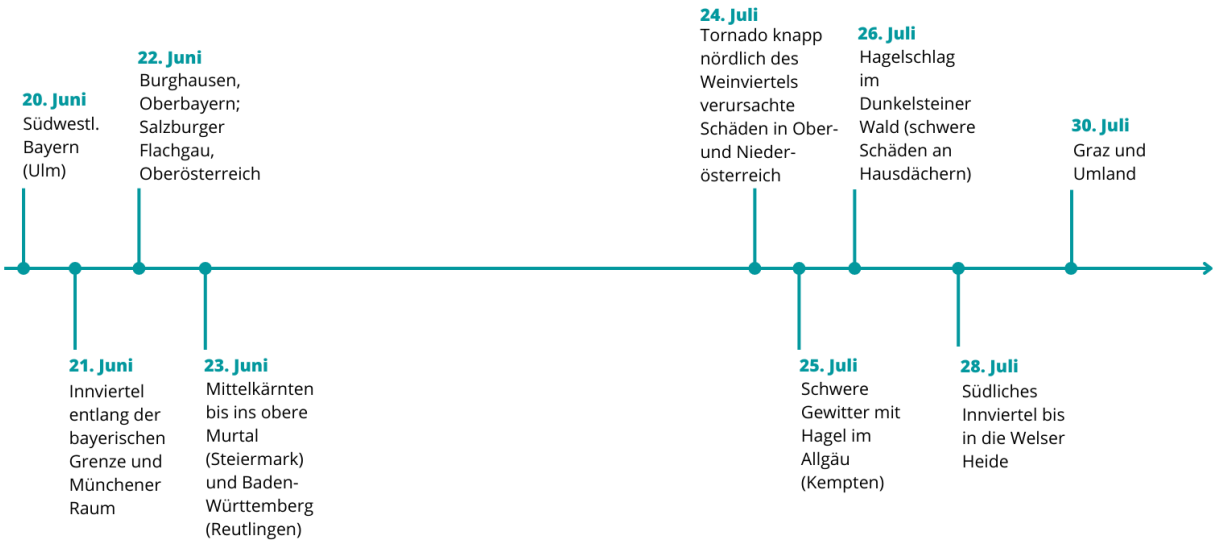


Abbildung 22: Hagelereignisse in Österreich und Süddeutschland vor und nach dem Unwetter "Bernd" 2021.

Quellen: (Stangl 2022), European Severe Weather Database (https://eswd.eu); eigene Darstellung.

Bei der Österreichischen Hagelversicherung wurden 2021 landwirtschaftliche Schäden durch Hagel und Sturm in Höhe von 110 Mio. Euro gemeldet. Dabei erzeugte das Unwetter am 22. Juni im Salzburger Flachgau und in Oberösterreich das Ereignis mit den grössten finanziellen Schäden. Mit extremen Hagelschäden in Ober- und Niederösterreich war der 24. Juni der Tag mit den grössten finanziellen Schäden (Stangl 2022).

5.4 Aufzeigen Katastrophenvorsorge

Im Vergleich zu den Jahren 1999, 2002 und 2005 gab es in Oberbayern zahlreiche gewichtige Investitionen in den Hochwasserschutz auf Basis zweier Hochwasserschutzaktionsprogramme des Landes Bayern. Übereinstimmend besteht die wasserwirtschaftliche Einschätzung in Rosenheim und im Berchtesgadener Land, dass man «schutzbaulich durch» sei, d.h. alles Nötige und Mögliche getan habe.

Die geringen Schäden durch «Bernd» in Rosenheim und den umliegenden Landkreisen werden zum einen mit dem vergleichsweise geringen Niederschlags- und Überflutungsgeschehen (geschätzt HQ10- HQ20) durch «Bernd» in der Region, aber auch mit einer funktional hinreichenden Schutzinfrastruktur in der Region begründet. Es gab keine Kapazitätsübertretungen oder Funktionsstörungen der Schutzinfrastrukturen. Aus Sicht der Schutzwasserwirtschaft geht es daher in Zukunft darum, den nicht-strukturellen Schutz zu verbessern, d.h. Bauvorsorge, Risikobewusstsein der Bürgerinnen und Bürger sowie in den Kommunen. Die Probleme der Bewältigung bei den Sturzfluten lagen bei «Bernd» in den Bereichen Müllentsorgung und private Ölschäden (bei 150-200 Kellern). Beim Thema Frühwarnung ging es um die Frage der Erreichbarkeit besonderer Zielgruppen, nicht aber der Schaffung neuer Warninfrastrukturen. Die Warn-Apps des DWD u.a. waren im Geschehen weit verbreitet und funktionierten; die Vorwarnzeit lag bei ca. zwei bis drei Stunden. Es gab allerdings gehäufte Schäden in Hanglagen (z.B. bei Ebersberg), so dass sich weitergehende Aufgaben im Bereich der Ausbildung von Architektinnen und Architekten in Bezug auf den Schutz für Bauten in diesen Lagen stellen.

Die lange Historie von heterogenen, lokal extremen Niederschlägen (bis zu T=500/T=1000 Jahren) im Berchtesgadener Land hat den Hochwasserschutz in der Region über Jahre geformt im Sinne von ertüchtigt. Auch das Handeln des Katastrophenschutzes in der Lage «Bernd» war routiniert und unaufgeregt. Vereinzelt gab es nach «Bernd» zwar wasserbauliche Handlungsbedarfe bei der Geschieberückhaltung im Verlauf von Gewässern zweiter und dritter Ordnung («ausgebaute Wildbäche»). Da es sich aber nur um

lokale Strukturmassnahmen handelte, die als «Unterhaltsmassnahmen» verbucht werden konnten, sind auch diese bereits ein Jahr nach «Bernd» abgeschlossen. Beim Thema Frühwarnung bestehen allenfalls Verbesserungsmöglichkeiten durch Stärkung des lokalen Bezugs der Informationen (Betroffenheit einzelner Strassenzüge, Gewässerabschnitte mit besonderen Problemlagen) und durch klare Verhaltenshinweise (nicht reine «Pieps»-Warnsignale). Es braucht daher zusätzlich zu den Sirenen etc. auch Lautsprecheransagen im Notfall. Anders als in Rosenheimer Land wird nur von wenigen Schäden in Hanglagen berichtet, z.B. in Bischofswiesen, so dass kein spezieller Zusatzbedarf in der Bauvorsorge in diesen Lagen gesehen wird.

Das Hochwasserereignis im Sommer 2005 im Oberpinzgau war der Auslöser für die Planung und Umsetzung erster Hochwasserschutzmassnahmen. Die Wassermengen in der Salzach bei einem weiteren Hochwasserereignis Ende Juli 2014 führten dazu, zusätzliche Möglichkeiten des Wasserrückhaltes im Talboden der Oberen Salzach zu suchen. Letztlich wurde in der Gemeinde Neukirchen ein grundsätzlich geeigneter Standort überprüft, dessen Wirksamkeit aber nicht ausreichte, um eine entsprechende Abminderung des Hochwasserabflusses am Pegel Mittersill zu erreichen. Unmittelbar angepasst wurden nach 2014 bestehende Hochwasserschutzanlagen (z.B. Dammabdichtungen Mittersill) und auch die Überströmsektion an der Salzach zur Dotation des Rückhaltebereiches oberhalb von Mittersill (Ortsteil Rettenbach) wurde baulich nochmals adaptiert.

Die gute Bewältigung des Hochwasserabflusses im Jahr 2014 hat aber auch dazu geführt, dass man sich in Mittersill „sehr sicher gefühlt" hat. Vor dem Ereignis 2021 waren die folgenden Hochwasserschutzmassnahmen im Oberpinzau vorhanden: Längenverbau, Abriegelung des Talbodens Mittersill, Hubbrücke Mittersill sowie Verschlüsse/Linearausbauten. Die Vorwarnzeiten lagen bei etwa 24 Stunden, was ausreichend Zeit lässt, um unmittelbare Massnahmen zu treffen.

48 Stunden vor dem Ereignis war eine sehr genaue Niederschlags-und-Abflussprognose vorhanden, doch die Ereignisdauer war länger als erwartet. Die Schutzinfrastruktur konnte die Wassermengen aufhalten, allerdings hätten wenige Stunden mehr Regen ausgereicht, um eine Katastrophe auszulösen. Die Wassermengen des Ereignisses 2021 waren grösser als jene vorangegangener Ereignisse.

Nach dem Ereignis im Sommer 2021 wurde die Schutzinfrastruktur für das Gewerbegebiet Mittersill West angepasst.

- Nach dem Julihochwasser 2021 wurden engmaschige Profilmessungen an der Oberen Salzach, aber auch umfangreiche Räumungen durchgeführt und grundsätzliche Abschätzungen zum Feststofftransport (bzw. dessen Kapazität) getroffen.
- Beabsichtigt ist schrittweise ein System von Messstellen zum Feststofftransport zu etablieren.
- Geplant ist ausserdem 8-10 Mio. Kubikmeter Wasser in den Tauerntälern zurückzuhalten, ohne Ausbaumassnahmen adaptieren zu müssen.

Da das Schadensausmass durch Unwetter an verschiedenen Standorten unterschiedlich zu erwarten ist, muss eine Schlichtung der Konflikte zwischen verschiedenen Interessensgruppen stattfinden. Der Träger sämtlicher Massnahmen zur Verbesserung der Hochwassersituation (insbesondere Wasserrückhalt in den Tauerntälern) ist der Zusammenschluss der Gemeinden als „Wasserverband Obere Salzach". Die Ausweisung von Gefahrenzonen wird auch nach der Umsetzung weiterer Schutzmassnahmen nicht zurückgenommen werden.

Fraglich ist, ob künftig querabriegelnde Bebauungen zugelassen werden sollen. Verklausungen werden im Land Salzburg bei drohender Gefahr unmittelbar geräumt. Der Einsatzleiter der jeweiligen Bezirksverwaltung (Katastrophenschutzreferent) kann Soforthilfeeinsätze mit vollständiger Kostenübernahme anordnen, wodurch nicht zunächst die Frage der Kostendeckung geklärt werden muss. Drohnenflüge können künftig regelmässig notwendige Wildbachbegehung zur Verhinderung von Verklausungen erleichtern.

Exkurs: Austrian impact-based Multi-hazard Advice Service (AMAS)

Im November 2022 hat das Land Salzburg gemeinsam mit der GeoSphere Austria ein Pilotprojekt gestartet. Es forciert ähnlich dem Europäischen ARISTOTLE-Projekt (Michelini et al., 2020) eine disziplinenübergreifende Zusammenarbeit mit dem Ziel, mögliche schädigende Ereignisse noch schneller zu erkennen und zusammenhängende Gesamtbedrohungen gemeinsam und auswirkungsorientiert zu beurteilen, um vor allem in multiplen Szenarien kompakte Handlungsempfehlungen für die Behörden zum Wohle der Salzburger Bevölkerung abzuleiten.

Der sehr gute Austausch zwischen den einzelnen Fachabteilungen wird im Rahmen dieses Projekts institutionalisiert. Dabei hat das Referat Sicherheit und Katastrophenschutz zum einen eine durchgängige Rufbereitschaft. Zum anderen kommen im Zuge dieses Projekts die unterschiedlichen Fachabteilungen montags und donnerstags präventiv zusammen und stimmen sich auf Grundlagendaten der GeoSphere Austria und der sonstigen Partner ab und diskutieren Multi-Hazard-Szenarien und Auswirkungen.

Nach einer Einigung auf eine „grünen" Situation wird das Treffen aufgelöst, im Falle einer Gefahrensituation „orange" oder „rot" liefert die GeoSphere Austria einen Bericht sowie eine mündliche telefonische Information. Anschließend beruft das Referat Sicherheit und Katastrophenschutz alle relevanten Sachverständigen zu einem online Meeting für die Situationsanalyse ein. Der „Situational Awareness Mode" (SAM) wird in einen „fast SAM" umgewandelt. Das bedeutet, die Abstimmungstreffen finden noch häufiger (täglich) statt. Im März 2023 wird das Projekt erstmals evaluiert.
(Michelini et al. 2020)

Die Datengrundlagen wie Gefahrenzonenpläne, Abflussuntersuchungen oder Modelle im Wasserbau sind in Tirol fast flächendeckend vorhanden. Schwachstellen sind auf Basis dieser Daten sehr gut sichtbar. Das Ereignis im Juli 2021 ist auch deshalb recht glimpflich ausgegangen, weil die flussbaulichen Hochwasserschutzmassnahmen Schutz boten. Hochwassermeldungen werden in Tirol über mehrere Kanäle verbreitet. Meldungen kommen auch von der GeoSphere Austria. Grössere Gewässer mit längeren Vorwarnzeiten hat man gut im Griff. Für kleinere Gewässer sind die Vorhersagen aufgrund von lokalen Niederschlagszellen schwieriger. Bereits vor dem Unwetterereignis 2021 war die Erstellung von Gefahrenzonenplänen für die Stadtbäche Kufsteins in Planung, allerdings war das öffentliche Interesse vor dem Ereignis gering.

In Zusammenarbeit zwischen dem Land Tirol, den Bezirkshauptmannschaften des Landes sowie den Gemeinden Tirols wurden vor etwa 10 Jahren individuelle Risikoanalysen für alle 279 Tiroler Gemeinden durchgeführt und mit der webbasierten Plattform „Risiko-Informations-System ORTIS" in Form von Risikomanagementplänen dokumentiert. Diese flächendeckende Risikoanalyse, ähnlich jener im Kanton Graubünden, ermöglicht die präventive Kontrolle von Gefahren und bildet die Grundlage für vorbereitende Massnahmen im Rahmen der Risikosteuerung (Landesrechnungshof 2013) (Amt für Wald und Naturgefahren des Kantos Graubünden 2023). Anders als im Kanton Graubünden wurde das Projekt jedoch nicht fortgesetzt und eine erneute Überprüfung der Gefahrenlage und -einschätzung in Form von individuellen Risikoanalysen wurde nur in einzelnen Gemeinden vorgenommen.

5.5 Generelle Erkenntnisse

Die Hochwasserereignisse in den vergangenen Dekaden in Salzburg (z. B. Oberpinzgau, Hallein) haben das Bewusstsein der Entscheidungspersonen für derartige Ereignisse weitreichend verändert und haben dazu geführt, dass schutzbauliche Massnahmen und die Hochwasservorwarnung ertüchtigt wurden. Diese Infrastruktur hat im Land Salzburg im Juli 2021 gut funktioniert. Der Einsatz von Sirenen mit gleichzeitiger Handlungsanweisung für die Bevölkerung durch die Medien wird als notwendig erachtet und soll auch künftig nicht durch Warn-Apps oder Cell-Broadcasts ersetzt, sondern ergänzt werden. Zusätzlich

können Warn-Apps oder Soziale Medien zum Einsatz kommen, um auf Gemeindeebene gezielt zu informieren. Das Teilen von Informationen ist so beispielsweise für einzelne Strassenzüge möglich.

Die Niederschlags- und Abflussmodelle der Salzach im Oberpinzgau wurden nach 2021 neuerlich überprüft und Anpassungen wurden vorgenommen. Für die Analysen wurde fundierte wissenschaftliche Expertise hinzugezogen, um neben einer qualitativ hochwertigen Bearbeitung auch hohes Vertrauen hinsichtlich der Kommunikation an die Bevölkerung zu garantieren. Eine Schlüsselerkenntnis ist, dass es im Talboden nur begrenzten Schutz geben kann, denn beim Ereignis im Oberpinzgau im Sommer 2021 war jegliche Retentionsfläche in Verwendung. Ähnliche Schlüsse werden auch vom Wasserbau im Land Tirol gezogen: Wasserwirtschaft und Raumordnung müssen gemeinsam betrachtet werden, denn Hochwasser braucht «Raum». Dennoch ist Eigenverantwortung noch bedeutender als das Ausreizen letzter Kubikmeter, die noch für den Wasserrückhalt verwendet werden können.

Darüber hinaus ist es die Strategie der Salzburger Fachabteilungen (Wasserbauverwaltung und Wildbach- und Lawinenverbauung), dass es zu keiner Zurücknahme der Zonierung nach der Errichtung von Schutzeinrichtungen kommt. Insgesamt wird so eine sehr rationale Schutzstrategie, inklusive der Vermeidung des Levee-Effekts (Zunahme der Siedlung aufgrund der Schutzbauten) betrieben. Es wurde auch immer wieder darüber diskutiert, ob die Definition eines 100-jährlichen Ereignisses angepasst werden sollte, nachdem drei Ereignisse dieser Art in den letzten beiden Dekaden in Mittersill eingetreten sind. Standardmässig wird das letzte Ereignis bei den Berechnungen durch den hydrographischen Dienst nicht herangezogen, weil es ein statistischer Ausreisser sein könnte. Für die Neuentwicklung gibt es die Idee, HQ300 als Bemessungsereignis für Wohnbauten zu verwenden. Jedoch steht diese Entwicklung in Konflikt mit zunehmend gefragtem Wohnraum.

In Tirol bewirkten die beschriebenen Ereignisse die Sensibilität und das Lokalwissen der Einsatzorganisationen zu erhöhen. Die Erfahrungen zeigen, dass es ein kurzes Zeitfenster nach einem Ereignis gibt, in dem Schutzmassnahmen zügig umsetzt werden können, da die Bereitschaft der Gemeinden und der Bevölkerung anschliessend wieder abnimmt. Ähnliche Schlüsse werden auch in der Gemeinde Mittersill im Oberpinzgau gezogen:

> *„Ohne das Hochwasser 2005 wären wir an der Umsetzung des Hochwasserschutzprojekts Mittersill gnadenlos gescheitert. Ein halbes Jahr später war es schon wieder schwer das einzufordern und mit Bildern zu dokumentieren.*“ – Dr. Viertler, Bürgermeister Mittersill, Salzburg

Ausserdem wurde erkannt, dass das Freiräumen von Geschieberückhaltebecken und die sorgfältige Instandhaltung für eine funktionierende Infrastruktur im Ereignisfall essenziell ist. Die geregelte Kostenübernahme von Soforthilfeeinsätzen, angeordnet durch den Katastrophenschutzreferenten, wie im Land Salzburg kann das unmittelbare Räumen erleichtern.

Da es keine hundertprozentige Sicherheit vor Naturgefahren geben kann, ist eine Beratung zum Thema Restrisiko für Gemeinden und Privatpersonen sowie deren eigenverantwortliches pro-aktives Handeln erforderlich, um eine Risikoreduktion zu erreichen.

6 Fallstudien

6.1 Ziel und Vorgehen

In diesem Kapitel vertiefen wir die Analyse mittels Fallstudien. Wir untersuchen im Detail am Beispiel von zwei Regionen zwei Fragen:

– Welchen Beitrag zur Schadensreduktion können Flächenschutz- und Objektschutzmassnahmen leisten?
– Welchen Beitrag zur Schadensreduktion können Alarmierung und mobile Schutzmassnahmen erzielen?

In Absprache mit dem Auftraggeber wurden zwei Regionen ausgewählt, Menznau im Kanton Luzern und die Gemeinde Valley im oberbayerischen Landkreis Miesbach. Ausschlaggebend bei der Wahl war, dass beide Regionen in den Voralpen liegen und topographisch vergleichbar sind. Überschwemmungsrisiken ergeben sich in beiden Regionen sowohl durch Oberflächenwasser als auch durch das Ausufern von Bächen. Entscheidend bei der Wahl war auch, dass in beiden Gebieten in den letzten Jahren verschiedene Flächenschutzmassnahmen realisiert wurden und beim Unwetter 2021 ihre Schutzwirkung zeigen konnten. Das Unwetter 2021 war hinsichtlich des Niederschlags in beiden Regionen annähernd vergleichbar. Während Menznau von mächtigen Hagelzügen betroffen war, blieb Valley von Hagelschäden weitgehend verschont. Schliesslich haben die lokalen und regionalen Behörden in beiden Regionen die Untersuchung wohlwollend und interessiert unterstützt. Ohne den Zugang zu diesen Stellen wären die Fallstudien nicht durchführbar gewesen.

Zur Analyse werden zwei Methoden eingesetzt. Erstens haben wir aus Vor-Ort-Gesprächen mit den zuständigen Behörden Erfahrungen und Einschätzungen über Schutzmassnahmen und das Krisenmanagement (Alarmierung, kritische Schnittstellen) erhoben. Zweitens stützen wir uns auf die Ergebnisse von hydraulischer Simulation für diese beiden Regionen. Diese werden von der Firma RIOCOM mit der Simulationssoftware Visdom durchgeführt. Dabei wird zunächst das Modell mit der Ist-Situation der Region (ca. 50-100 km²) kalibriert und anschliessend werden verschiedene Szenarien bezüglich Naturereignisse und Schutzmassnahmen untersucht. Aufgrund der Erfahrungen im Jahr 2021 steht der Starkregen im Zentrum der Analyse. Berücksichtigt werden sowohl pluviale als auch fluviale Prozesse. Bei den Szenarien-Simulationen werden verschiedene Niederschlagsintensitäten, Infiltration- und Interzeptionskapazitäten angenommen und damit die Wirkung von Massnahmen zur Hochwasserabwehr untersucht und visualisiert. Das Hauptergebnis sind gebäudegenaue Gefahrenanalyse für beide Regionen. Diese zeigen auf, welchen Wassertiefen die Gebäude bei den verschiedenen Szenarien ausgesetzt sind.

Auf die geplante Ermittlung des monetären Schadens musste aus methodischen Gründen verzichtet werden. Die in der Literatur dafür verwendete Schadensfunktion des früheren Bundesamts für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) erwies sich als zu wenig differenziert. Ein grosser Teil der Gebäude ist gemäss der Simulationen Wassertiefen von unter 50 cm ausgesetzt. Da die Schadensfunktion des BUWAL ein merkliches Schadensausmass erst über einer Wassertiefe von 50 cm annimmt, erachten wir eine Schadensbewertung nicht zielführend. Auch ist der Eintritt von Wasser nicht nur von der Wasserhöhe bestimmt, sondern von den gebäudespezifischen Durchlässen (Fenster, Einfahrten, etc.). Die Schadenshöhe ist im Weiteren abhängig von der Unterkellerung (nicht in den Daten vorhanden) und ob und wie ein Eintritt ins Erdgeschoss erfolgt. Diese detaillierten Daten sind nicht vorhanden. Zudem war die gebäudegenaue Zuordnung der Daten der Gebäudeversicherung Luzern nur bei etwa der Hälfte der Objekte möglich, da viele Adressdaten ohne Hausnummern sind. Aus diesen Gründen erachten wir ein Ausweisen eines monetären Wertes als zu ungenau und wenig belastbar. Eine ausführliche Diskussion dazu findet sich im Bericht von RIOCOM (Kapitel 5.6). Die Ergebnisse der Gefahrenanalyse geben aber den lokalen Behörden und Gebäudeversicherungen wertvolle Erkenntnisse, um vor Ort die von wesentlichen Wassertiefen betroffenen Gebäuden einer Abklärung zu unterziehen. Besteht angesichts der dokumentierten Gefahr ein substanzielles Schadenspotenzial, sind Abklärungen über Objektschutzmassnahmen angezeigt.

Dieses Kapitel ist wie folgt aufgebaut. Zunächst sind die Ergebnisse der Untersuchungen für Menznau und Valley dargestellt. Dabei werden jeweils nach einem Gebietsüberblick die wichtigsten Schutzmassnahmen erläutert und die Erfahrungen und Lehren aus den Unwettern 2021 dargestellt. Diese Erkenntnisse beruhen auf Zeitungsartikeln und Gesprächen mit Personen aus den jeweiligen Gebieten. Schliesslich werden anschliessend für Menznau und Valley die wichtigsten Ergebnisse der Simulationen dargestellt. Der ausführliche technische Bericht von RIOCOM ist als separater Bericht verfügbar. Darin sind das verwendete Simulationsmodel Visdom und die Kalibrierung des Models für beide Gebiete erläutert sowie die Ergebnisse der Szenarien im Detail beschrieben.

6.2 Fallstudie Menznau

6.2.1 Gebietsüberblick

Das Dorf Menznau liegt im Tal der Seewag, welche von Südosten nach Nordwesten entwässert. Die Morphologie nördlich der Seewag ist geprägt durch eine sanfte Hügellandschaft, während sich die südlich der Seewag liegenden Gebiete durch die tief eingeschnittenen Bäche (z.B. Rickenbach, Rüdelbach, Zopfgraben) und steile Hügel auszeichnen. Den tiefsten Punkt der Gemeinde bildet das Tal der Seewag mit ca. 582 müM. Der höchste Punkt liegt im Südwesten an der Grenze zu Willisau Land mit 1’109 müM. (Liniger et al. 2007, S. 12). Die Gemeinde hat eine Wohnbevölkerung von etwa 3000 Personen und weist eine Einwohnerdichte von ca. 100 Einwohner/km² auf.

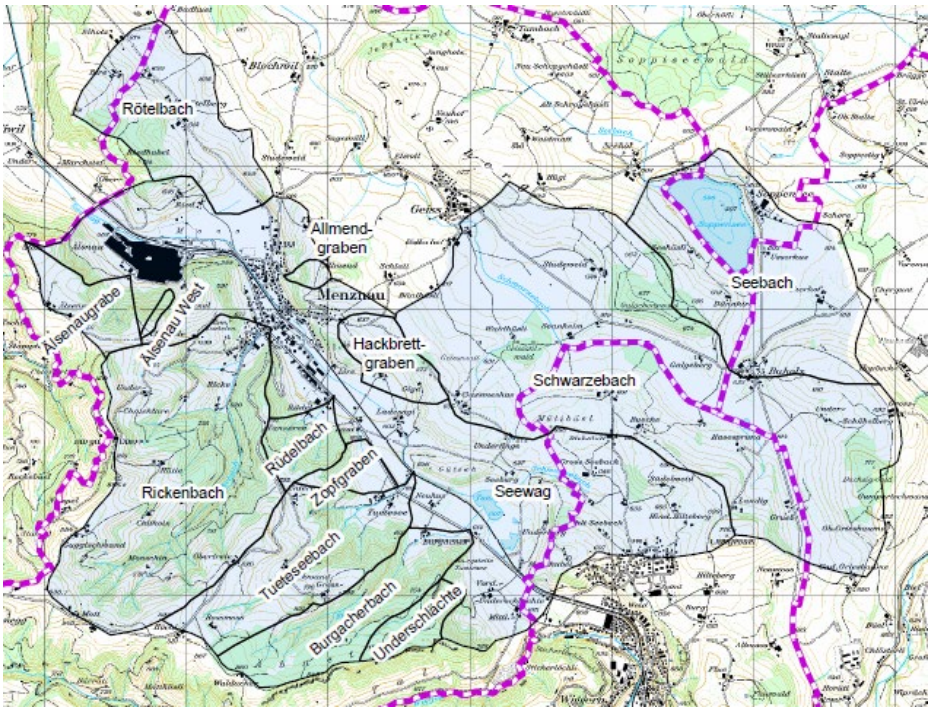


Abbildung 23: Menznau: Einzugsgebiete der Gewässer
Quelle: Gefahrenkarte Menznau (Liniger et al., 2007).

Die folgenden Informationen stützen sich auf das Gespräch und die Begehung am 24.11.2022 in Menznau mit Beat Blum (Gemeindeammann) und Markus Wigger (Gebäudeversicherung Luzern) und den Telefongesprächen mit Stefan Müller (Feuerwehrkommandant) und Vinzenz Graf (Feuerwehrinspektor Gebäudeversicherung Luzern).

6.2.2 Schutzmassnahmen

Die Gemeinde Menznau hat umfassende Flächenschutzmassnahmen gegen Überschwemmungen realisiert. Die wichtigsten sind in der Tabelle 3 aufgeführt und Beispiele sind in Abbildung 25 dargestellt. Zudem sind diverse kleinere Bäche, die aus Südwesten Richtung Seewag fliessen, ebenfalls mit Sperren und teils Rückhaltebecken verbaut. Dank dieser Massnahmen ist der grösste Teil des Dorfkerns der Hochwasser-Gefahrenstufe gering (gelb) zugewiesen.

Temporäre Massnahmen: Die planbaren Massnahmen sind in der Notfallplanung Menznau festgelegt. Darin sind alle kritischen Punkte festgehalten mit den dazu notwendigen konkreten Massnahmen. Notfallplanung wurde initiiert und finanziert durch die GVL. Dabei handelt es sich in der Regel um Massnahmen durch die Feuerwehr (Sandsäcke). An gewissen Orten ist auch die Bevölkerung bei solchen Massnahmen den einbezogen.

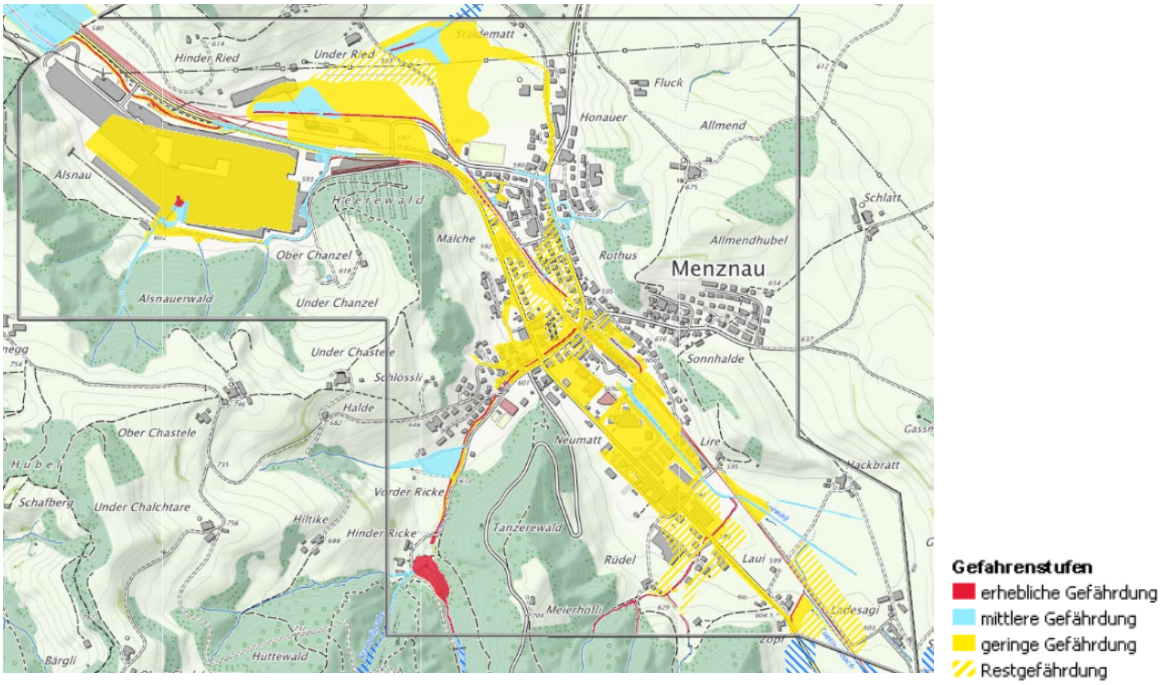


Abbildung 24: Menznau: Gefahrenkarte Wasser

Quelle: Geoportal Luzern.

Tabelle 10: Wichtige Flächenschutzmassnahmen der Gemeinde Menznau

Gewässer	Beschreibung	Inbetriebnahme
Rickenbach	Rückhaltebecken, Geschiebesammler, Sperren, Eindolungen	2016
Seewag	Rückhaltebecken	2017
Rüdelbach	Geschiebesammler, Gerinneaufweitungen, Holzsperren	2021
Zopfgraben	Geschiebesammler, Gerinneaufweitungen, Holzsperren	2022

Quelle. Gefahrenkarte Menznau und Gespräch und Begehung mit B. Blum, 24.11.2022.



Abbildung 25a/b: Beispiele von Flächenschutzmassnahmen: Rückhaltebecken Rickenbach (links), Geschiebesammler am Rüdelgraben (rechts)
Quelle: Eigene Fotos.

Ergänzende Objektschutzmassnahmen sind weitgehend Sache der Grundeigentümer. Die GVL kann solche Massnahmen unterstützen, aber in Menznau war dies sehr selten der Fall. Hingegen prüft die GVL alle Baugesuche. In den Jahren 2020 bis 2022 hat die GVL 27 Gesuche geprüft und bei 10 Gesuchen Auflagen verlangt und bei weiteren 10 Hinweise und Empfehlungen abgegeben. Die Wirkung dieser präventiven Massnahmen ist bei den Neubauten entlang der Seewag gut sichtbar (vgl. Abbildung 26a/b).



Abbildung 26a/b: Objektschutzmassnahmen entlang der Seewag
Quelle: Eigene Fotos.

Schutzmassnahmen gegen Oberflächenwasser werden weniger systematisch geprüft. Zum einen, weil teilweise das Bewusstsein dafür erst in den letzten Jahren gestiegen ist. Zum andern sind Daten dazu erst seit 2016 verfügbar, aber nicht behördenverbindlich. Oberflächenwasser kann mit kleinen baulichen Massnahmen umgelenkt werden, betrifft aber in der Regel nicht ein einzelnes Gebäude, sondern vielfach mehrere Objekte. Die GVL prüft den Schutz gegen Oberflächenwasser im Rahmen der Baubewilligungen.

Schutzmassnahmen gegen Hagel werden von der GVL finanziell gefördert. So übernimmt die Versicherung die Kosten der Hagelbox bei Storenautomaten bei Gebäuden mit zentraler Steuerung.

6.2.3 Erfahrungen und Lehren aus den Unwettern 2021

Betroffenheit

Menznau ist verschiedentlich von Überschwemmungen heimgesucht worden. Allein in den 2000er Jahren fünf Mal (2003, 2005, 2009, 2011, 2014).[6] Das Unwetter 2021 verursachte v.a. wegen des Hagels mit grosser Hagelgrösse hohe Schäden im Südwesten der Gemeinde.[7] Auch Oberflächenwasser führte zu vereinzelten Überschwemmungen. Hingegen kam es dank der Rückhaltebecken zu keinen Überflutungen im Dorf (Rickenbach, Seewag). Einzige Ausnahme war eine kleine Überflutung der Seewag beim Parkplatz des Holzwerks im Norden der Gemeinde. Insgesamt standen 55 Angehörige der Feuerwehr und 20 Personen des Zivilschutzes im Einsatz. Ihre Hauptaufgabe bestand darin, Gebäude mit Plastik abzudecken und die Dachdecker beim Erstellen der Notdächer zu unterstützen. Ein Gebäude wurde aufgrund des Wassereintritts über das zerstörte Dach unbewohnbar.

Alarmierung

Bei Hochwasser wird der Alarm automatisch bei Überschreiten von Pegelständen in den beiden Rückhaltebecken ausgelöst. Beim Unwetter 2021 wurden diese Werte nicht erreicht. Bei Oberflächenwasser und Hagel wird der Alarm durch Anrufe der Eigentümer von Liegenschaften oder durch Beobachtung der kritischen Punkte durch Feuerwehr ausgelöst. Diese Kanäle haben 2021 gut funktioniert. Insgesamt gingen 55 Alarmmeldungen ein. Alarmierungen und Evakuierungen der Bevölkerungen waren 2021 nicht notwendig.

Kommunikation

Direkte Kommunikation mit Festnetztelefonie und E-Mail mit Führungsstelle im Feuerwehrgebäude (notstromgesichert). Vorteile: Keine Nutzung einer Notrufnummer, die im Ernstfall besetzt ist. Zudem sind E-Mail mit Schadensmeldungen einfacher zu behandeln (Aufnahme, Priorisierung, Erledigung). Die Warnsysteme über MeteoSchweiz haben sich als wirksam erwiesen.

Zusammenarbeit der Behörden

Die Zusammenarbeit der Feuerwehr mit der Polizei über die Einsatzzentrale war sehr gut. Mit den angrenzenden Gemeinden bestand ebenfalls ein guter Austausch dank persönlicher Beziehungen. Die GVL unterstützt bei überregionalen oder grossen Ereignissen die lokalen Feuerwehren. Es stehen Katastropheneinsatzleiter zur Verfügung, die bei Bedarf die Führung übernehmen. Das wird als sehr wertvoll eingeschätzt und hat auch 2021 gut funktioniert. Die Zusammenarbeit mit der Gemeinde könnte aus der Sicht der Feuerwehr noch verbessert werden. Wohl ist die Feuerwehr im Gemeindeführungsstab vertreten, aber es gibt wenige gemeinsame Übungen. Anliegen der Feuerwehr (Finanzen, Einsatz von grossen Maschinen) stehen in Konkurrenz mit anderen Anliegen und haben aus Sicht der Feuerwehr bei den Behörden nicht immer eine genügend hohe Priorität.

Erfahrungen in der Region

Eine Auswertung der GVL (Graf, 2021) zeigt, dass Schutzmassnahmen gegen Starkniederschlag und Hochwasser weitgehend funktioniert haben, z.B. auch die Beaverschläuche in Luzern. Dennoch drang durch den Wasserdruck von unten vereinzelt Wasser in Keller ein. Eine Herausforderung waren die grossen Hagelschäden aufgrund der Korngrösse von 7 bis 9 cm. Im Raum Wolhusen – Ruswil – Beromünster bis Hitzkirch (inkl. Menznau) waren über 500 Notdächer notwendig. Es fehlte an Material für Abdeckung, an Dachdeckerliften und es waren zu wenige Fachleute (Dachdecker) verfügbar. Deshalb wurden Teams mit einer Fachperson und zwei Personen aus Feuerwehr oder Zivilschutz gebildet. Die Bewältigung der zahlreichen Schadensfälle war sehr aufwändig, da die Schätzungen aufgrund der vielfältigen Schäden

[6] Einen guten Eindruck des Unwetters 2014 in Menznau gibt dieses Video: https://youtu.be/1xqiACJx-fE

[7] Eine gute Dokumentation zum Hagel am 28. Juni 2021 im Kanton Luzern aus der Sicht der Feuerwehr findet sich in Graf 2021.

(Dach, Photovoltaik, im Innern des Hauses) und der Anliegen der Hauseigentümer, gleichzeitig die Gebäude zu verbessern, sehr kompliziert waren.

6.2.4 Ergebnisse der Simulationen

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Ergebnisse der Simulationen für die Gemeinde Menznau dargestellt. Die Modellgrundlagen, die Kalibrierung und die Ergebnisse im Detail finden sich im technischen Bericht von RIOCOM. Mit diesen Simulationen wird die Bedeutung von Flächenschutzmassnahmen in der Gemeinde Menznau evaluiert, das Gefahrenpotenzial von Starkniederschlag aufgezeigt und damit das Potenzial von weiteren Schutzmassnahmen aufgezeigt. Untersucht werden fluviale (Flusshochwasser) und pluviale (Oberflächenabfluss aufgrund von Starkregen) Prozesse.

Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet in Menznau umfasst die südwestlich der Ortschaft liegenden Hänge und Täler. Die Oberflächenabflüsse infolge Starkregen sammeln sich in mehreren Bächen, die in der weiteren Folge in die Seewag münden. Die numerische Simulation umfasst Abflussmodellierungen in folgenden Gewässern (Reihung von Süden nach Norden):

– Underschlächtebach
– Burgacherbach
– Schwandbach
– Rüdelbach
– Rickenbach
– Gräben aus den Fluren Chanzel und dem Älsnauerwald nördlich der Firma Swiss Krono

An den einzelnen Bächen wurden in der Vergangenheit Geschiebesammler errichtet, die eine Retentionswirkung besitzen. Bedeutend sind die Hochwasserrückhaltebecken Hackbrett (Seewag) und jenes am Rickenbach. Diese weisen eine signifikante Retentionswirkung auf.

Szenarien

Wir fokussieren auf die Analyse von Starkniederschlag, weshalb die folgenden Szenarien für Menznau simuliert werden, jeweils mit Dauerstufe „D=60 min". Die Niederschlagswerte basieren ausser bei Szenarien 6 auf den Werten gemäss MeteoSchweiz (siehe für die Herleitung der Bericht RIOCOM). Um die Wirkung des HRB Rickenbach zu analysieren, wird eine Szenario ohne HRB gerechnet (Szenario 5):

1. T10: Bestandsgeometrie mit T=10 Jahren
2. T30: Bestandsgeometrie mit T= 30 Jahren
3. T30-HRB: T=30 Jahre ohne Hochwasserrückhaltebecken Rickenbach „HRB"
4. T100: Bestandsgeometrie mit T= 100 Jahren
5. T100-HRB: T=100 Jahre ohne Hochwasserrückhaltebecken Rickenbach „HRB"
6. T100-OAK: Bestandsgeometrie mit T= 100 Jahren (65 mm/h; Wert gemäss Oberflächenabflusskarte „OAK")
7. T100-KW: Bestandsgeometrie mit T=100 Jahren plus 15 % Klimawandelzuschlag (74,75 mm/h; Basis ist der Niederschlag gemäss Oberflächenabflusskarte, denn dieser ist etwa 14 % höher als jener basierend auf Werte von MeteoSchweiz)

Abflüsse an ausgewählten Bächen

Die Abbildung 27 und Abbildung 28 zeigen die Abflussganglinien am Unterlauf des Rüdel- und Rickenbachs für die unterschiedlichen simulierten Szenarien. Die Scheitelabflusswerte variieren erwartungsgemäss je nach gewählter Niederschlags-Intensität (abhängig von der Wiederkehrzeit „T").

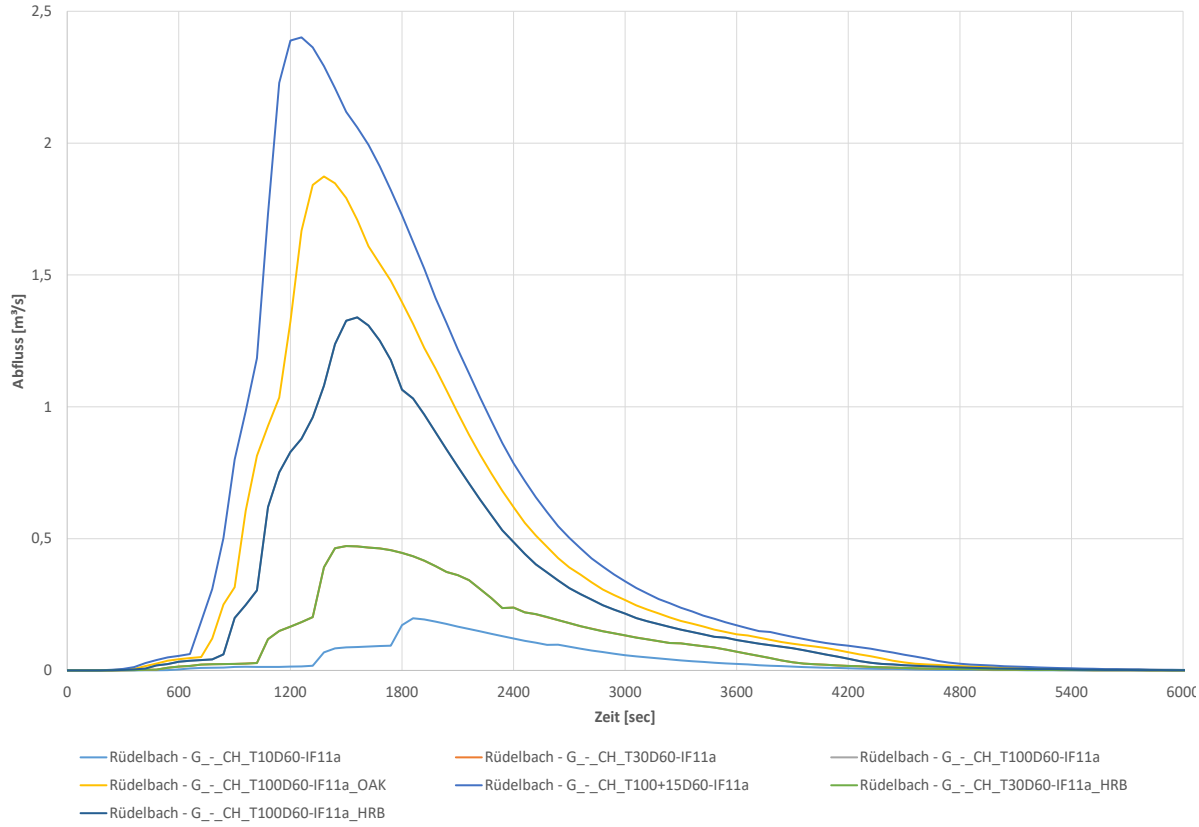


Abbildung 27: Abflussganglinie Rüdelbach

Quelle: RIOCOM.

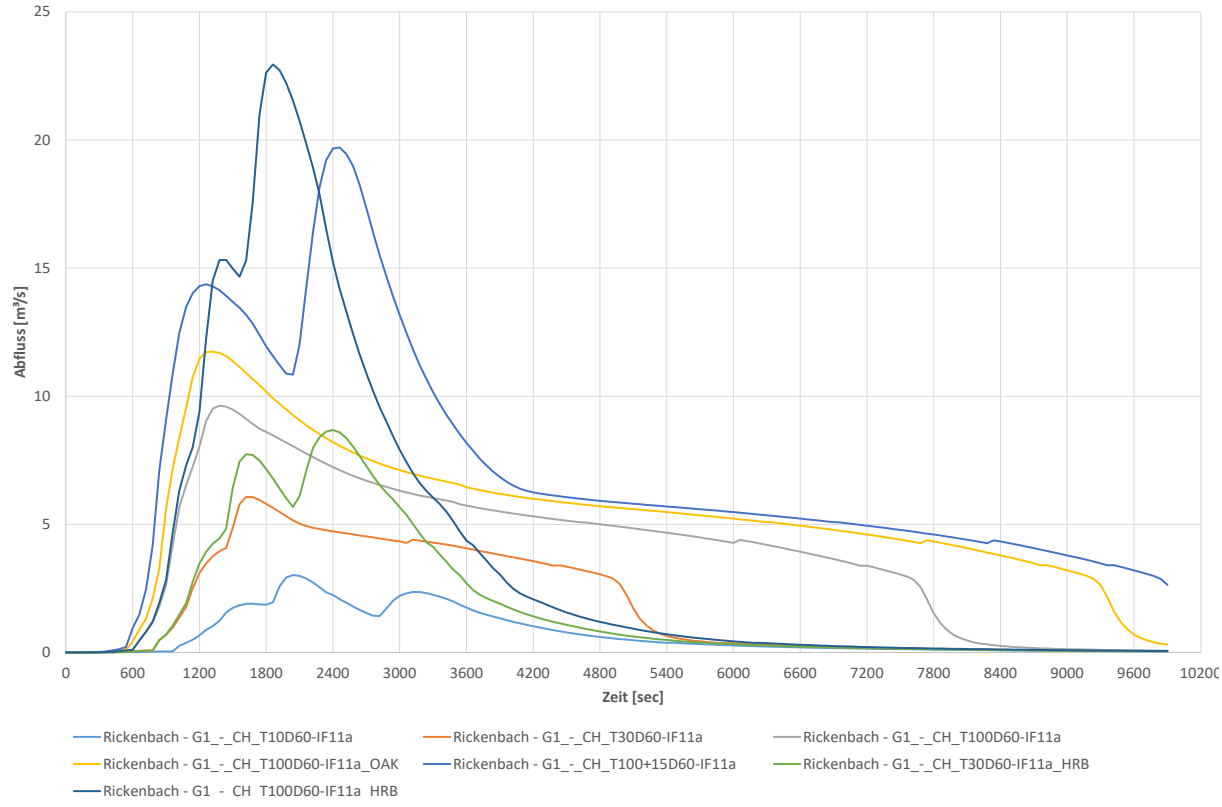


Abbildung 28: Abflussganglinie Rickenbach

Quelle: RIOCOM.

Interessant ist der Vergleich der Abflussganglinien am Rickenbach. Dort wurden fiktive Szenarien ohne das vorhandene Hochwasserrückhaltebecken simuliert (T30D60-IF11a_HRB und T100D60-IF11a_HRB). Diese weisen naturgemäss deutlich höhere Scheitelabflusswerte auf als die direkten Vergleichsrechnungen (T30D60-IF11a und T100D60-IF11a) mit dem Hochwasserrückhaltebecken. Das Rückhaltebecken am Rickenbach hat also sowohl bei einer dreissig- als auch bei einem hundertjährlichen Niederschlagsintensität eine bedeutende Rückhaltewirkung. Jedoch kommt das Rückhaltebecken beim Szenario mit T=100 Jahren +15 % Klimawandelzuschlag an seine Grenzen. Es verzögert den Abfluss, aber überläuft anschliessend bei sehr hohem Abfluss.

Wassertiefen

Die Wirkung des Rückhaltebeckens Rickenbach lässt sich auch gut an der Überflutungssituation infolge Oberflächenabflüssen nach Starkregen erkennen. Die Farbgebung der Wassertiefen orientiert sich dabei an jener der Oberflächenabflusskarte des Kantons Luzern.

Augenscheinlich ist die Zunahme der überfluteten Bereiche sowie der Wassertiefen (grössere Anteile an dunkelvioletten Flächen) bei Gegenüberstellung der Szenarien mit und ohne vorhandene Hochwasserrückhaltebecken. In Abbildung 29 ist diese Gegenüberstellung bei einer Jährlichkeit von 100 Jahren dargestellt. Schliesslich visualisiert Abbildung 30, dass beim Szenario mit T=100 Jahren inklusive 15 % Klimazuschlag das Rückhaltebecken in seiner gegenwärtigen Ausbaustufe seine Wirkung verliert. Die Überflutungen sind ähnlich wie bei T=100 Jahre ohne Rückhaltebecken.

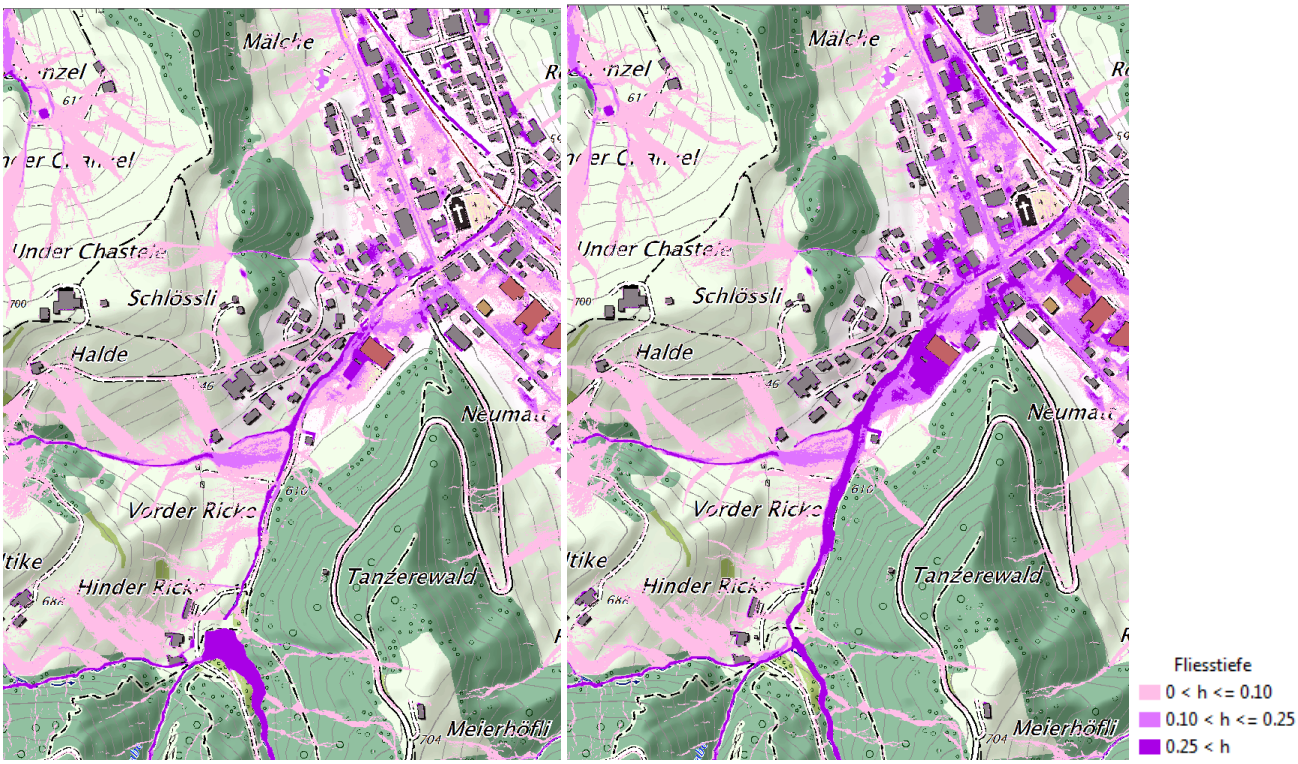


Abbildung 29a/b: Wassertiefen in den überfluteten Bereichen eines Beispielausschnitts in Menznau für die Szenarien mit T=100 Jahren (links) und T=100 Jahren ohne HRB Rickenbach (rechts)
Quelle: RIOCOM, Das Rückhaltebecken befindet sich am unteren Rand des Ausschnitts; grosse violette Fläche links.

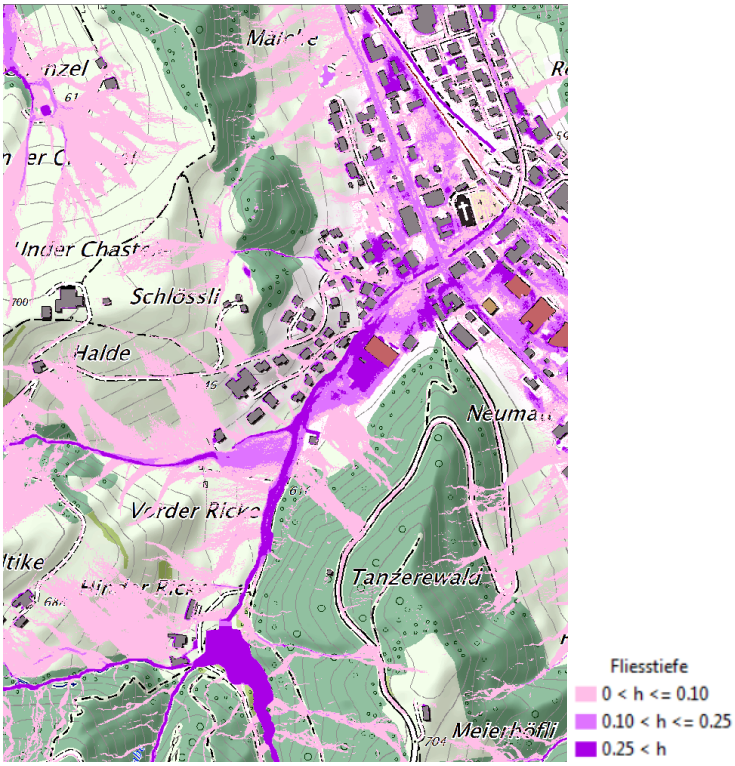


Abbildung 30: Wassertiefen in den überfluteten Bereichen eines Beispielausschnitts Menznau für das Szenario mit T=100 Jahren inklusive 15 % Klimazuschlag.
Quelle: RIOCOM.

Gefahrenanalyse

Ziel der Gefahrenanalyse ist die Ausweisung der potenziell betroffenen Gebäude und die Ermittlung der zu erwartenden Wassertiefen, differenziert für die jeweiligen Szenarien. Methodisch basiert die Gefahrenanalyse auf einem Verschnitt der Wassertiefen aus den numerischen Simulationen mit einem Datensatz der Gebäudeumrisse. Die Wassertiefen an den Gebäuden können als Mittelwert oder als Maximalwert ausgewiesen werden. In diesem Bericht weisen wir die Betroffenheit basierend auf Maximalwerten aus (die Betroffenheit gemäss Mittelwerten findet sich im angehängten Bericht von RIOCOM). Mit der Verwendung der Maximalwerte zeigen wir im Sinne des Vorsorgeprinzips die maximal mögliche Gefahr. Diese Auswertungen können dann als Basis genutzt werden, um in einer gebäudebasierten Einzelbetrachtung das Schadenspotenzial detailliert zu beurteilen und, falls nötig, Objektschutzmassnahmen festzulegen. Diesen Schritt können wir im Rahmen dieser Studie jedoch nicht vornehmen.

Insgesamt sind in Menznau bei den betrachteten Starkregen-Szenarien zwischen 924 und 928 Gebäude von Überflutungen betroffen (siehe Tabelle 11). Während die Gesamtanzahl der potenziell betroffenen Gebäude über die Szenarien betrachtet nahezu konstant bleibt, verändert sich die Anzahl der Gebäude innerhalb der Wassertiefen-Klassen merklich. Je höher die Niederschlagsmenge (diese steigt mit zunehmender Wiederkehrzeit „T"), desto weniger Gebäude finden sich in den Klassen mit geringeren Wassertiefen (siehe Abbildung 31 sowie Tabelle 11). Der Einfluss des Rückhaltebeckens Rickenbach ist beim hier simulierten Starkregen begrenzt. Bei einer Wiederkehrzeit von 30 Jahren (T=30) sind die Unterschiede bei der Betroffenheit mit oder ohne RHB klein. Bei T=100 Jahre wird die Wirkung des RHB deutlicher: Vor allem die Gefahr von grossen Wassertiefen nimmt etwas ab (von 254 auf 246 Gebäuden), aber die Gefahr bleibt in der Gemeinde Menznau weiterhin hoch. Das liegt darin, dass auch viele Gebäude ausserhalb des Einflussbereichs des Rückhaltebeckens Rickenbach vom Starkregen betroffen sind.

Tabelle 11: Anzahl der betroffenen Gebäude in der Gemeinde Menznau (Maximalwerte)

Bereich	T10	T30	T30 - HRB	T100	T100 - HRB	T100 - OAK	T100 - KW
0,00 - 0,05	87	53	54	41	41	39	36
0,05 - 0,10	83	65	62	51	49	46	37
0,10 - 0,25	229	207	206	166	153	150	136
0,25 - 0,50	200	203	201	196	199	186	182
0,50 - 0,75	108	122	125	132	135	138	144
0,75 - 1,00	72	76	76	96	97	102	93
>1,00	145	199	201	246	254	267	300
Gesamt	**924**	**925**	**925**	**928**	**928**	**928**	**928**

Quelle: RICOM, Angaben der Wassertiefen in der linken Spalte in Metern.

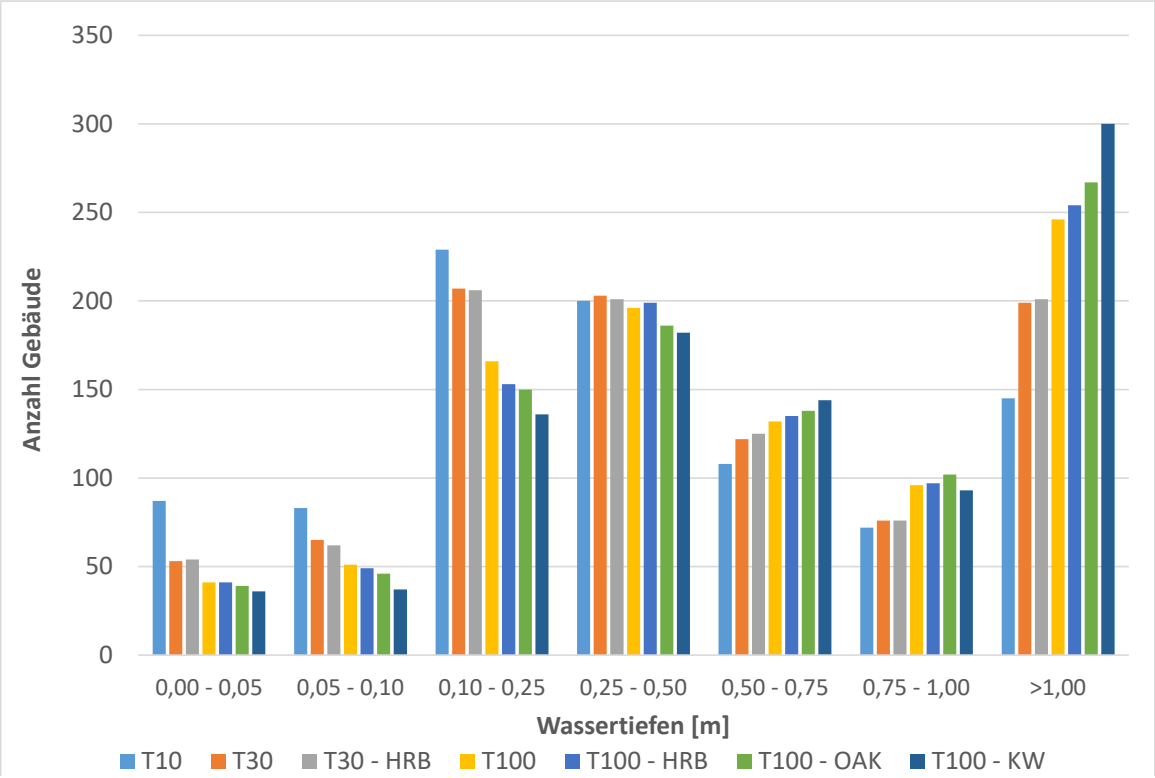


Abbildung 31: Anzahl Gebäude je Wassertiefen-Klasse in Menznau
Quelle: RIOCOM.

Die Simulationen erlauben eine gebäudegenaue Auswertung. Abbildung 32 und Abbildung 33 zeigen die Betroffenheit der einzelnen Gebäude differenziert nach der maximalen Wassertiefe für die beiden Szenarien mit T=30 und T=100 plus 15 %.

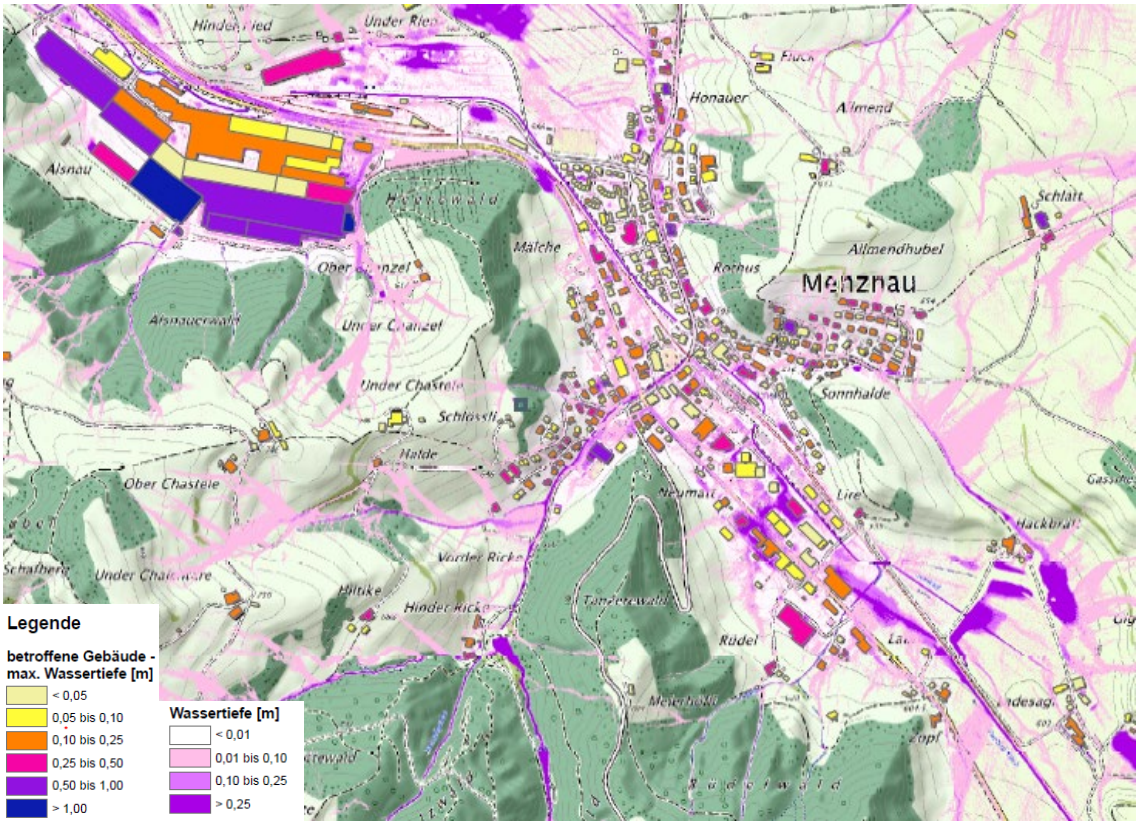


Abbildung 32: Maximale Wassertiefe der Gebäude bei T30-D60 in Menznau

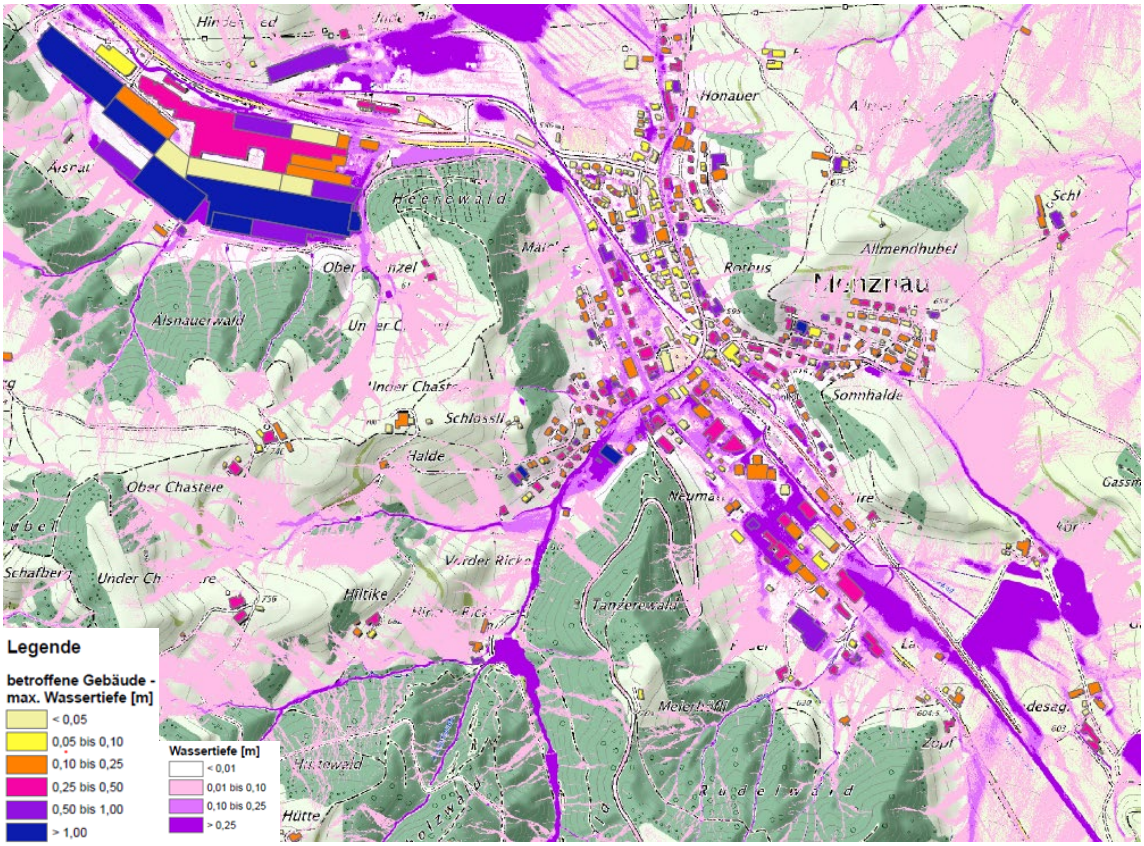


Abbildung 33: Maximale Wassertiefe der Gebäude bei T100-D60 plus 15 % in Menznau

Erkenntnisse aus der Simulation für Menznau

Aus den Simulationen können die folgenden Erkenntnisse gezogen werden:

1. Bei Starkregen – dieser wurde hier simuliert - sind in allen Szenarien eine beträchtliche Anzahl von Gebäuden einer maximalen Wassertiefe von 10 bis 50 cm ausgesetzt. Solche Wassertiefen können abhängig von möglichen Gebäudedurchlässen bereits einen beträchtlichen Schaden anrichten. Es ist gut möglich, dass sich der Wassereintritt bei diesen Wassertiefen durch Objektschutzmassnahmen vermeiden lässt.
2. Dem Risiko von Überschwemmungen von grösser als 50 cm sind je nach Szenario zwischen 325 und 537 Gebäuden ausgesetzt. Das ist eine beträchtliche Zahl und es ist bei diesen Gebäuden mit substanziellen Schäden zu rechnen. Die Schadensfunktion des BUWAL unterstellt bei solchen Wassertiefen Schäden von 10 bis 30 % des Gebäudewerts, abhängig vom Gebäudetyp. Besonders bei Gebäuden, die bereits bei T=10 Jahre derart betroffen sind, ist unserer Ansicht nach eine Einzelfallprüfung zu empfehlen. Es gilt dabei zu klären, welcher Schaden zu erwarten ist, ob Objektschutzmassnahmen den Schaden reduzieren können oder ob Flächenschutzmassnahmen notwendig sind. Ein Einsatz von mobilen Schutzmassnahmen ist bei Starkregen vielfach nicht zielführend, da die Vorwarnzeit zu kurz ist.
3. Die beiden Rückhaltebecken in Menznau wirken bei Starkregen, jedoch ist die Schutzwirkung begrenzt. Wohl reduzieren die Rückhaltebecken die potenziellen Wassertiefen bei den Gebäuden, die im Einflussbereich der beiden Becken liegen, aber es gibt eine grosse Zahl von Gebäuden, die substanzielle Überflutung von Oberflächenwasser ausgesetzt sind, aber ausserhalb des Einflussbereichs der beiden Becken liegen.

6.3 Fallstudie Valley

6.3.1 Gebietsüberblick

Das Untersuchungsgebiet in der Gemeinde Valley umfasst das Einzugsgebiet des Darchinger Dorfbaches sowie die westlich davon Richtung Norden entwässernden Hanglagen. Das oberirdische Einzugsgebiet des Darchinger Dorfbachs entwässert ein Gebiet von ca. 8,8 km² Grösse. Das Gewässer durchquert von Süden nach Norden die Ortsteile Oberdarching, Mitterdarching und Unterdarching bis zur Einmündung in die Mangfall bei Valley.

Die Topografie des Gebietes ist vom Übergang der Süsswassermolasse (steilere Hangbereiche im Süden) zu den flachen Niederterrassen im Norden des Einzugsgebietes geprägt. Der höchste Punkt des Einzugsgebietes liegt mit 791 müM südlich von Wildschwaiger. Von dort aus entwässert der gesamte Bereich Richtung Norden. Flussab von Mitterdarching weist der Darchinger Dorfbach zwei Engstellen an der Querung der Eisenbahn sowie der Bundesautobahn 8 (kurz: BAB 8) auf (vgl. Abbildung 34).

Der Darchinger Dorfbach ist ein kleines Gewässer. Die Unterhaltungslast liegt bei der Gemeinde Valley. Die Gemeinde Valley besitzt insgesamt 3,200 Einwohner. Die Siedlungen im Einzugsgebiet sind ländlich geprägt. Die Einwohnerdichte beträgt 76 Einwohner/km².

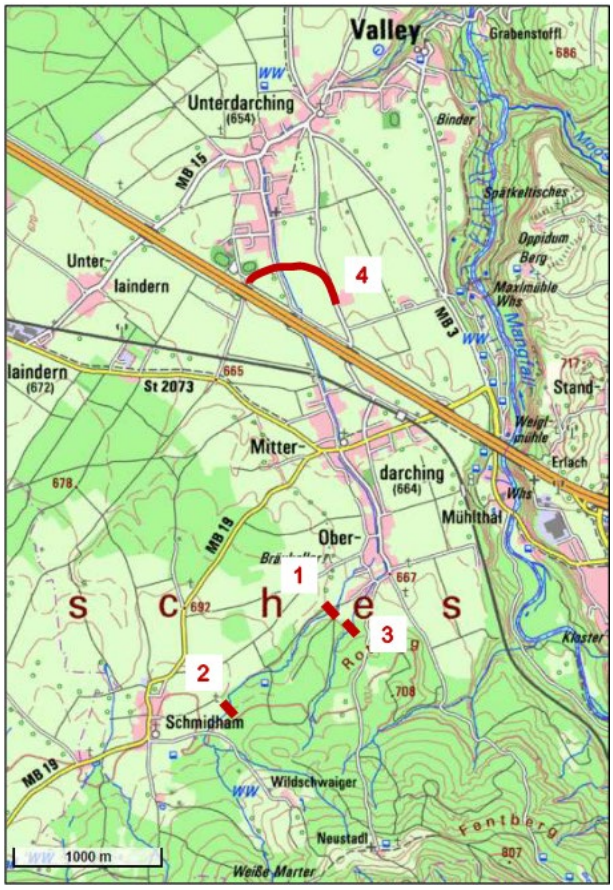


Abbildung 34: Gemeinde Valley – Einzugsgebiet des Darchinger Dorfbachs und Hochwasserrückhaltebecken in Planung

Quelle: Ingenieurbüro Kokai GmbH (2018).

6.3.2 Schutzmassnahmen

Am linken Oberlauf des Darchinger Dorfbachs, dem Kaltenbach, gibt es ein Hochwasserrückhaltebecken (HRB). Dieses besteht aus einem etwa 3,3 m hohen Absperrbauwerk und besitzt einen gewöhnlichen Hochwasserrückhalteraum von etwa 3'000 m³. Das Bauwerk ist im IST-Zustand als „kleines Hochwasserrückhaltebecken" nach DIN 19700 einzustufen, geplant ist ein Ausbau durch Aufstockung auf ein Rückhaltevermögen von etwa 25'000 m³.

Im integralen Hochwasserschutz- und Rückhaltekonzept (vgl. Ingenieurbüro Kokai GmbH, (2018)) der Gemeinde sind neben dem Ausbau des Hochwasserrückhaltebeckens am Kaltenbach (Standort 1) zwei kleinere HRB am Schmidham (Standort 2) und am Rotberg (Standort 3) sowie eine Flutmulde unterhalb der BAB 8 (Standort 4). In den Simulationen wird nur das Ausbauszenario (Standort 1) berücksichtigt.

Die Gemeinde hat kein "Integrales Konzept zum kommunalen Sturzflutmanagement". Diese werden von der bayerischen Landesregierung seit 2018 mit einem Zuwendungssatz von 75 % gefördert (Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (2018)), aber wurden bisher nur von knapp 20 % der bayerischen Gemeinden umgesetzt, weil sie nicht behördenverbindlich vorgeschrieben und aufwändig zu erstellen sind.

6.3.3 Erfahrungen und Lehren aus den Unwettern 2021

Der Landkreis Miesbach wurde von den Sommerunwettern 2021 schwer betroffen. Anhaltend starke Niederschläge am 24./25. Juli führten nachfolgend zu Überschwemmungen und Hochwasser. Am Montagabend (26.7.2021) stand ein Streifen zwischen Darching und der Landkreisgrenze in Irschenberg unter Wasser. Anwohner berichteten von über 40 Litern Regen, die innerhalb von knapp 20 Minuten niedergegangen sind; begleitende Hagel und Sturmböen richteten zusätzlich Schäden an. Insbesondere über dem Taubenberg entluden sich starke Wassermengen, so dass es zu drei Seiten des Berges durch Sturzfluten und herabströmende Bäche zu Überflutungen kam.

Die Untersuchungsgemeinde Valley war in Ober- und Mitterdarching stark vom Sommerunwetter 2021 betroffen. Durch langanhaltenden Starkregen wurden Strassen überfluteten, Keller liefen voll; teilweise stand das Wasser in Erdgeschossen, zwei Öltanks schwammen auf (siehe Abbildung 35). Die betroffenen Gemeinden waren mehrere Stunden nach Einsetzen der Überschwemmungen nur notdürftig geschützt, bis mit dem Eintreffen von Einsatzkräften des Technischen Hilfswerks (THW) und der Feuerwehren aus benachbarten Gemeinden genügend Sandsäcke und Material zur Verfügung standen. Zuvor schützten sich die Darchinger Bürger mit Dämmen aus Stallmist. Um die Helfer von Feuerwehr, Rotem Kreuz und Technischem Hilfswerk besser koordinieren zu können, stellte das Landratsamt am Montagabend, den 26.7.2021, um kurz nach 22 Uhr den Artikel 15 Katastrophenschutzgesetz fest - die Vorstufe zum Katastrophenfall -, so dass Einsatzleitung überregional durch den Kreisbrandrat geführt werden konnte.



Abbildung 35 a/b: Überschwemmungen in Oberdarching am 26. Juli 2021/ Notdürftiger Schutz mit Dämmen aus Stallmist

Quelle: © Thomas Gaulke.

Vereinzelt mussten im Landkreis Strassen wegen Überschwemmung gesperrt werden (z.B. die B 318 in Warngau). Die Bundesautobahn 8 (BAB 8), die durch das Untersuchungsgebiet führt, war allerdings nicht davon betroffen; sie war wegen des gleichzeitig tobenden Hagelsturms zeitweilig nicht befahrbar. (vgl. Abbildung 6a/b). Im Landkreis Miesbach gingen kleinere Muren ab, etwa 70 Keller mussten ausgepumpt werden.



Abbildung 36 a/b: Verkehrsbehinderung durch Hagel auf der BAB 8 / Strassensperrungen in Oberwarngau durch Muren

Quellen: © dpa/Jutta Steinhoff/© Bernd März.

Die Unwetterschäden 2021 haben einmal mehr - nach den Erfahrungen im Jahr 2013 und 2020 - vor Augen geführt, dass es Anpassungsbedarf beim Hochwasserschutzkonzept der Gemeinde Valley gibt (vgl. auch Merk und Höger (2021)). Das betrifft insbesondere eine bessere Einschätzung des Abflussgeschehens aus Niederschlägen auf den nahegelegenen Anhöhen (Schwarzberg und Fentberg), die Überprüfung der bestehenden Wasserrückhaltemassnahmen in den Anhöhen, aber auch Regenversickerungsmassnahmen in den Siedlungen und umliegenden land- und forstwirtschaftlichen Flächen sowie eine schnellere Mobilisierung und zielgenaue Konzentration von lokalen und überregionalen Einsatzkräften.

Die Gemeinde Valley hat entschieden, das Rückhaltebecken am Kaltenbach (wie hier modelliert) auszubauen und es wurden öffentlich zugängliche Verschläge für Sandsäcke für eine schnelle lokale Krisenreaktion errichtet (vgl. Abbildung 37).



Abbildung 37 a/b: Ausbau des Hochwasserrückhaltebeckens am Kaltenbach / Schutzmaterialbauten in Oberdarching

Quelle: © Thomas Plettenberg

Nach dem Starkregenereignis im Sommer gab es zusätzliche Anstrengungen zur Stärkung des Gefahrenbewusstseins der Hauseigentümer und Hauseigentümerinnen in der Gemeinde Valley. Im November erging ein Schreiben an alle Bachlaufanlieger/-innen und alle von Überschwemmungen Betroffenen mit

Informationsmaterial und Checklisten, anhand derer die Bürgerinnen und Bürger sich einen Überblick verschaffen können, welche Möglichkeiten es gibt, um sich besser zu schützen. Eine angedachte Begehung von Haus zu Haus mit Vertretern der Ortsfeuerwehr, um anhand einer Checkliste Schwachstellen an den Gebäuden zu analysieren und geeignete Schutzmassnahmen vorzuschlagen, wurde allerdings auf Grund der vorherrschenden Corona-Lage im Winter 2021 abgesagt. Die Einsatzpläne der lokalen Feuerwehren wurden im Landkreis Miesbach im Lichte der Unwetter 2021 überarbeitet.

6.3.4 Ergebnisse der Simulationen

Die Gefahrenanalyse im Untersuchungsgebiet Valley umfasst die Ermittlung der Überflutungsflächen und der darin auftretenden Wassertiefen an potenziell betroffenen Gebäuden für unterschiedliche Szenarien. Die betrachteten Szenarien umfassen einerseits Simulationen unterschiedlich intensiver Starkregen, die Berücksichtigung einer Erweiterung auf 25'000 m^3 Fassungsvermögen des Hochwasserrückhaltebeckens am Kaltenbach (Szenario 5) sowie die Einschätzung von flächigen Versickerungsszenarien für Regenwasser durch Ansetzen unterschiedlicher Infiltrationsraten.

Szenarien

Folgende Szenarien werden im Pilotgebiet Valley behandelt, jeweils mit Dauerstufe „D=60min“:

1. T10: Bestandsgeometrie mit T=10 Jahren
2. T30: Bestandsgeometrie mit T= 30 Jahren
3. T30-HRB: T=30 Jahre mit Erweiterung des Hochwasserrückhaltebeckens Kaltenbach „HRB“
4. T100: Bestandsgeometrie mit T= 100 Jahren
5. T100-HRB: T=100 Jahre mit Erweiterung des Hochwasserrückhaltebeckens Kaltenbach „HRB“
6. T100 KW: Bestandsgeometrie mit T=100 Jahren +15 % Klimawandelzuschlag (62,7 mm/h)

Die Simulationen der oben angeführten Szenarien erfolgten im Untersuchungsgebiet Valley mit dem am besten an die gemessenen Abflussganglinien am Messpunkt K3 passenden Infiltrationsset IF03, mit dem Rauigkeitsset K02 und ohne Berücksichtigung der Interzeption (Erklärung der Abkürzungen im Bericht RIOCOM).

Abflüsse am Darchinger Dorfbach

Nachfolgende Ganglinien zeigen die Abflüsse an der Querung des Darchinger Dorfbaches mit der Autobahn (unterhalb Standort 4 in Abbildung 34) für die simulierten Szenarien.

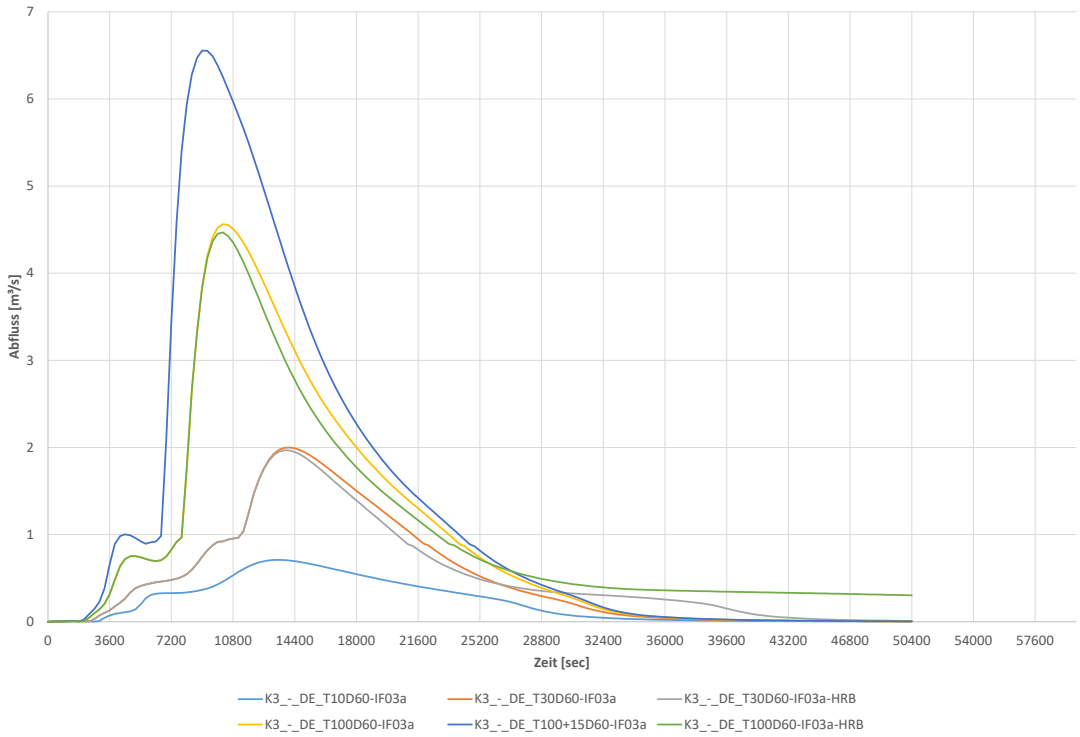


Abbildung 38: Abflussganglinien im Pilotgebiet Valley am Kontrollquerschnitt K3 (unterhalb der BAB 8)

Erwartungsgemäss nehmen die Scheitelwerte der Abflüsse sowie die Wellenfracht mit steigender Intensität / Wiederkehrzeit der Szenarien zu. Interessant ist der Vergleich der Abflussganglinien der Szenarien mit erweitertem Hochwasserrückhaltebecken am Kaltenbach (*T30D60-IF03a_HRB und T100D60-IF03a_HRB*) mit den Simulationen mit Bestandsgeometrie. Diese Läufe mit erweitertem Becken weisen naturgemäss niedrigere Scheitelabflusswerte auf als die direkten Vergleichsrechnungen (*T30D60-IF03a und T100D60-IF03a*). Die weniger stark gedrosselten Wellen sinken dafür deutlich rascher wieder gegen 0 ab (siehe Abbildung 38). Damit erfüllt das Hochwasserrückhaltebecken seine Zweckbestimmung: Die Dämpfung übermässiger Hochwasserwellen durch Zwischenspeicherung und kontrollierte, verzögerte Wiederabgabe.

Nachfolgende Abbildungen zeigen die Überflutungssituationen infolge Oberflächenabflüssen nach Starkregen für die einzelnen simulierten Szenarien an ausgewählten, aussagekräftigen Stellen. Die Farbgebung der Wassertiefen orientiert sich dabei an jener der Darstellungen im Pilotgebiet Menznau. Augenscheinlich ist die Zunahme der überfluteten Bereiche sowie der Wassertiefen (grössere Anteile an dunkelvioletten Flächen) bei Zunahme der Wiederkehrzeit „T“ sowie bei Gegenüberstellung der Szenarien mit und ohne das vorhandene Hochwasserrückhaltebecken. Sehr gut ersichtlich ist auch die effektiv gesteigerte Retentionswirkung bei Erweiterung des Hochwasserrückhalteckens am Kaltenbach. Diese zeigt sich durch Reduktion der Überflutungsflächen und Wassertiefen im Bereich Oberdarching (siehe dazu rote Ellipsen in Abbildung 39 bis Abbildung 41). (Ingenieurbüro Kokai GmbH, 2018)

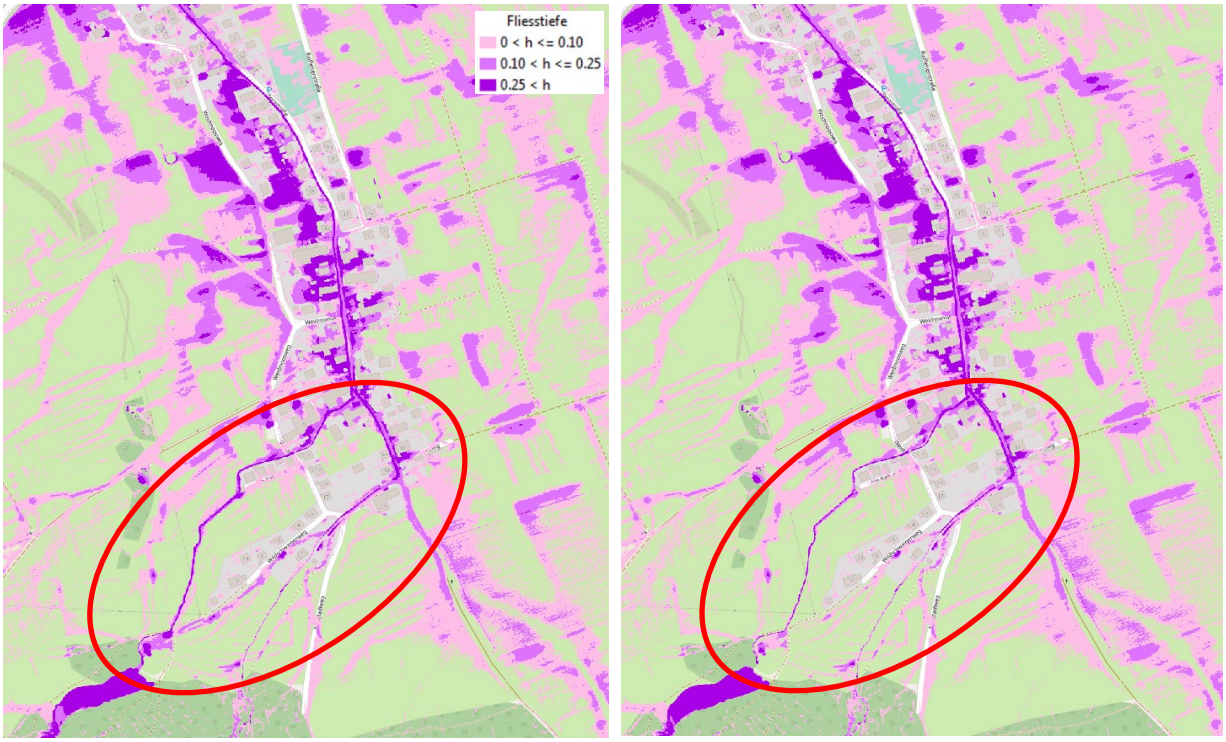


Abbildung 39: Wassertiefen in Valley für die Szenarien T=30 Jahren (links) und T=30 Jahren mit Erweiterung des HRB Kaltenbach (rechts)

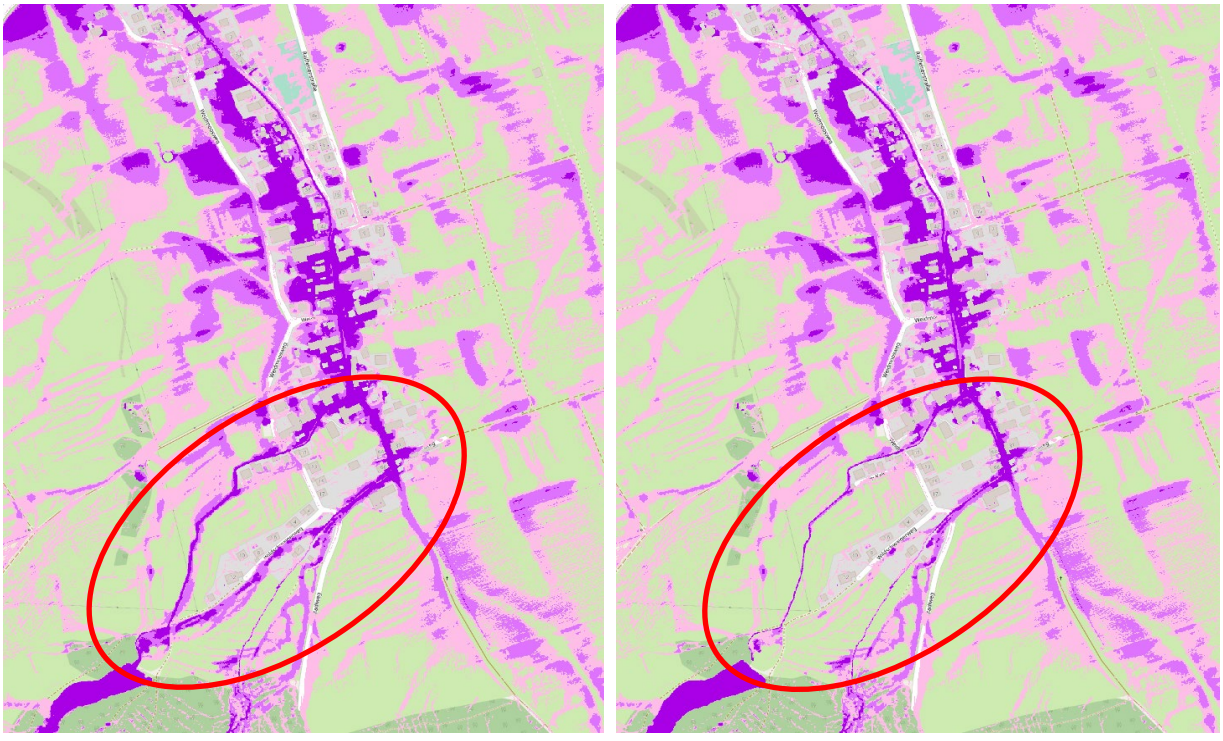


Abbildung 40: Wassertiefen in Valley für T=100 Jahren (links) und T=100 Jahren mit Erweiterung des HRB Kaltenbach (rechts).

Erläuterung: Die Überflutungen im linken Bild decken sich mit Ereignisbeschreibungen aus den Jahren 2016 und 2021.



Abbildung 41a/b: Wassertiefen in den überfluteten Bereichen und Wasserstände an Gebäuden
Beispielausschnitt in Unterdarching in den Szenarien T=100 Jahre (links) und T=100 + 15 % KW-Zuschlag (rechts).

Simulationen mit einem Klimawandelzuschlag (T=100 + 15 %) zeigen die Mächtigkeit zukünftiger Starkniederschläge (Abbildung 41) als Herausforderungen für den Schutz des innerörtlichen Bereichs von Unterdarching (zwischen Eichenweg und Fichtweg auf der Höhe Mühlfeldstrasse). Links die Hochwasserlage bei einem Niederschlagsextrem mit Wiederkehrintervall von T=100 Jahren bei ausgebautem Hochwasserrückhaltebecken am Kaltenbach; rechts die Lage bei T=100 Jahren zuzüglich 15 % KW-Zuschlag. Die Wassertiefen in den überfluteten Bereichen sind erkennbar höher (dunkelviolette Flächen nehmen zu), aber auch die Wasserstände an den Gebäuden im Dorf steigen deutlich (erkennbar z.B. von rot = 25-50 cm auf violett = 50-100 cm im rot umrandeten Ortskern), wie im Folgenden in der Gefahrenanalyse näher ausgeführt wird.

Gefahrenanalyse

Die Gefahrenanalyse erfolgt methodisch analog zu jener im Schweizer Untersuchungsgebiet Menznau. Insgesamt sind im simulierten Gebiet bei den betrachteten Starkregen-Szenarien 2181 Gebäude von Überflutungen betroffen (siehe dazu auch Tabelle 12). Während die Gesamtanzahl der potenziell betroffenen Gebäude über die Szenarien betrachtet konstant bleibt, verändert sich die Anzahl der Gebäude - wie bereits im Untersuchungsgebiet Menznau beobachtet - innerhalb der Wassertiefen-Klassen merklich. Je höher die Niederschlagsmenge (diese steigt mit zunehmender Wiederkehrzeit „T“), desto weniger Gebäude finden sich in den Klassen mit geringeren Wassertiefen (siehe Abbildung 42 sowie Tabelle 12). Bei einer Wiederkehrzeit T=10 Jahren umfasst die Klasse mit den geringsten Wassertiefen (0,00 – 0,05 m) 1071 Gebäude, im Szenario T100 mit 15 %-Klimawandelzuschlag sind nur mehr 5551 Gebäude mit maximal 5 cm Wassertiefe betroffen. Hier verlagert sich die Betroffenheit hin zu Klassen höherer Wassertiefe (z.B. 399 Gebäude mit 0,25 – 0,50 m statt 126 Gebäude im Szenario T10).

Die Klasse 0,00 bis 0,05 m umfasst auch im Untersuchungsgebiet Valley wiederum einige Gebäude, die nur sehr kleine, nahezu vernachlässigbare Wasserstände aufweisen. Tabelle 13 zeigt wie viele Gebäude in den unterschiedlichen Szenarien lediglich mit 1, 2 oder 3 cm maximalen Wasserstand betroffen werden. Durch Kombination von Tabelle 12 und Tabelle 13 lässt sich die Anzahl der potenziell betroffenen Gebäude in der Wassertiefenklasse bis 5 cm bei unterschiedlich angenommenen Wassertiefen-Schwellenwerten errechnen. Im Szenario T10 verringert sich die Anzahl der Gebäude in der Klasse bis 5 cm Wassertiefe beispielsweise um 706 Objekte, wenn diese mindestens 3 cm mittleren Wasserstand aufweisen sollen, um gezählt zu werden. Das sind immerhin knapp zwei Drittel der Gebäude in dieser Tiefenklasse. Je grösser die Überflutungsflächen bzw. je höher die Wassertiefen in den Szenarien, desto geringer fällt die Anzahl der gering betroffenen Gebäude aus. Bei T100 inkl. 15 %-Klimawandelzuschlag beträgt die Reduktion bei Anfangs-Wassertiefe von 3 cm aber immer noch 351 Gebäude der 555 potenziell betroffenen Gebäude in der Klasse 0,00 – 0,05 m entspricht.

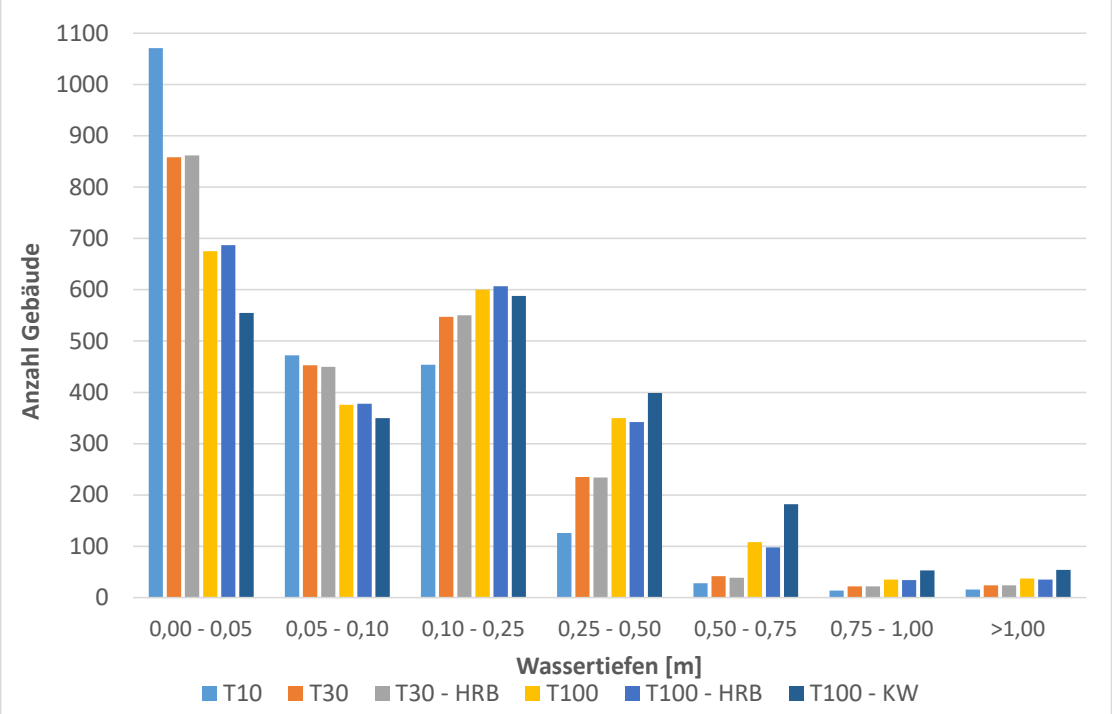


Abbildung 42: Anzahl Gebäude je Wassertiefen-Klasse in Valley

Tabelle 12: Anzahl der betroffenen Gebäude in der Gemeinde Valley (Maximalwerte)

Bereich	T10	T30	T30 - HRB	T100	T100 - HRB	T100 - KW
0,00 - 0,05	1071	858	862	675	687	555
0,05 - 0,10	472	453	450	376	378	350
0,10 - 0,25	454	547	550	600	607	588
0,25 - 0,50	126	235	234	350	342	399
0,50 - 0,75	28	42	39	108	98	182
0,75 - 1,00	14	22	22	35	34	53
>1,00	16	24	24	37	35	54
Gesamt	**2181**	**2181**	**2181**	**2181**	**2181**	**2181**

Tabelle 13: Anzahl der potenziell nur gering betroffenen Gebäude für unterschiedliche Wassertiefen für die simulierten Szenarien

WT-Grenze	T10	T30	T30 - HRB	T100	T100 - HRB	T100 - KW
< 0,001 m	130	89	90	59	61	41
< 0,01 m	278	229	230	172	177	130
< 0,02 m	501	407	408	306	318	237
< 0,03 m	706	568	571	446	458	351

Exkurs: Landnutzungsbezogene Regenversickerungsstrategien

Die nachfolgende Darstellung stellt unterschiedliche Infiltrationsgrade (IF) und deren Auswirkung auf die Ausuferung des Darchinger Dorfbachs in der Gemeinde Valley dar. Die Hochwasser dämpfende Wirkung einer Steigerung der Infiltrationsrate von gering (rot) bis hoch (blau) ist erkennbar, wie man in dem Rückgang der Ausuferungsflächen von links (geringe IF) nach rechts (hohe IF) und in der Überlagerung sieht.

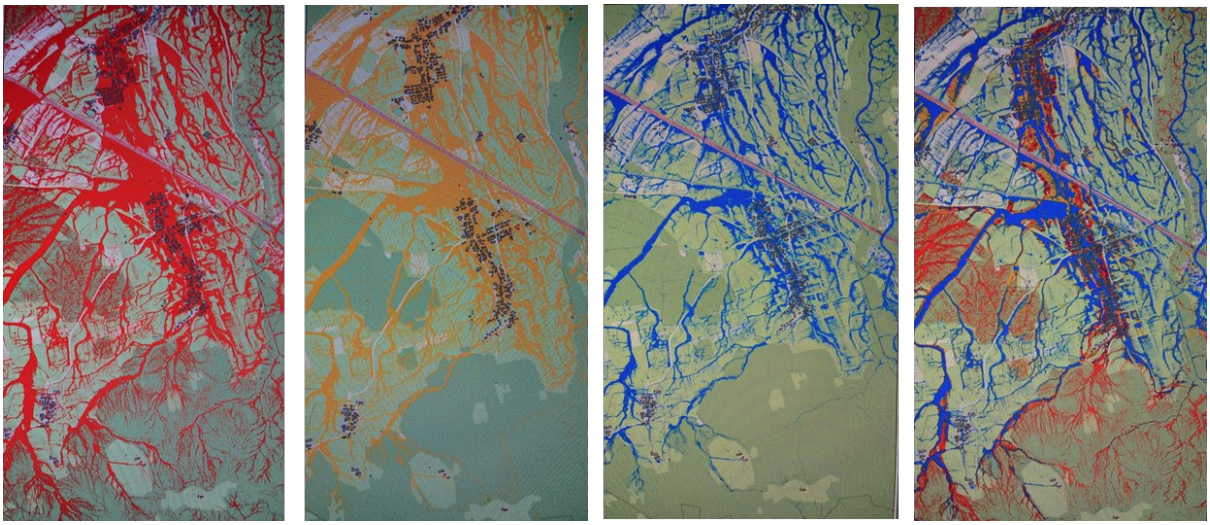


Abbildung 43 a/d: Infiltrationsraten 01 (gering, z.B. durch Walddegradation), IF03 (= Bemessungsrate), IF05 (hoch) sowie Überlagerungsszenario (mehrfarbig).

Im Einzugsgebiet des Darchinger Dorfbachs wurden in der Vergangenheit als Streuwiesen genutzte Flächen aufgeforstet. Dies kann eine Massnahme zur Erhöhung der Regenwasserversickerung sein. Der positive hydrologische Effekt entsteht allerdings nur, wenn dazu keine Drainage in den Flächen erfolgt. Diese kann sogar kontraproduktiv sein, wenn sie den Oberflächenabfluss zum Tal beschleunigt. Sinnvoller erscheint aus Sicht des Hochwasserschutzes die Begrünung von Tiefenlinien, d.h. eine möglichst raue Vegetation entlang der Fliesswege, um den Rückhalt zu fördern und die Fliessgeschwindigkeit zu reduzieren. Insgesamt muss die Umwandlung von land- in forstwirtschaftlich genutzte Flächen als Versickerungsstrategie unter einer Vielzahl von Nachhaltigkeitsaspekten gewertet werden wie biologische Vielfalt, regionale Versorgung mit Nahrungsmitteln und örtliche Kulturpflege.

Betrachtet man, ausgehend von den Überflutungsbildern und der daraus resultierenden Wassertiefen, die Anzahl der betroffenen Gebäude gruppiert nach Wassertiefen an den Gebäuden bei Anwendung unterschiedlicher Infiltrationsparameter-Sets, so fallen folgende Punkte auf (siehe Tabelle 14):

- Die Gesamtanzahl der potenziell betroffenen Gebäude bleibt mit 2220 bis 2224 in allen Szenarien nahezu gleich.
- Die Änderung der Infiltrationsraten und dadurch der Überflutungssituation führt zu signifikanten Verschiebungen zwischen den einzelnen Wassertiefen-Klassen.
- Bei Verringerung der Infiltrationsraten im Wald (Szenario IF02 und IF01) verringert sich die Anzahl der betroffenen Gebäude in Klassen geringer Wassertiefen. Gleichzeitig erhöht sich die Anzahl der Gebäude in Klassen höherer Wassertiefen.
- Bei Erhöhung der Infiltration auf landwirtschaftlichen Flächen (Szenario IF04 und IF05) kommt es im Vergleich zum Basisszenario (IF03) und auch zu den Szenarien IF02 und IF01 zu einer Verschiebung der betroffenen Gebäude von Klassen höherer Wassertiefen zu Klassen geringerer Wassertiefen.

Tabelle 14: Anzahl Gebäude je Wassertiefen-Klasse (Maximalwerte) in Valley bei Versickerungsstrategien

Bereich	IF01	IF02	IF03	IF04	IF05
0,00 - 0,05	577	673	738	978	980
0,05 - 0,10	344	361	391	477	478
0,10 - 0,25	499	548	573	529	527
0,25 - 0,50	417	378	332	158	158
0,50 - 0,75	221	172	113	36	36
0,75 - 1,00	101	44	32	14	13
>1,00	65	48	41	28	28
Gesamt	**2224**	**2224**	**2220**	**2220**	**2220**

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen, dass sowohl Erhöhungen als auch Verringerungen der Infiltration direkte Auswirkungen auf den Grad der Betroffenheit der potenziell betroffenen Gebäude haben. Flächenmaßnahmen zur Erhöhung der Infiltrationsraten können demnach als wirkungsvolle Hochwasserschutzmaßnahmen angesehen werden. Ein sorgsamer, nachhaltiger, schonender Umgang mit den Böden und der Vegetation im Einzugsgebiet ist notwendig, da es sonst umgekehrt zu deutlichen Verschlechterungen hinsichtlich der Überflutungssituation nach Starkregenereignissen kommen kann.

Erkenntnisse aus den Simulationen in Valley

1. Eine Strategie der Wasserrückhaltung durch Schutzinfrastrukturen scheint im Untersuchungsgebiet effektiv, muss aber an die höheren Niederschlagsmengen im Klimawandel angepasst werden. Das Überströmen der bestehenden Anlage am Kaltenbach in den 2010-er Jahren und zuletzt im Sommer 2021 gab den politischen Impuls zum Handeln (Ausbau der Kapazität auf 25'000 m^3).
2. Viele Gebäude werden in den unterschiedlichen Szenarien lediglich mit 1, 2 oder 3 cm maximalen Wasserstand betroffen. Die Zahl der schwer betroffenen Gebäude mit mehr als 50 cm wächst mit der Extremität und unter Berücksichtigung des Klimawandels allerdings beträchtlich. Gerade bei diesen Gebäuden muss "Haus für Haus" eine optimale Strategie der Anpassung gefunden werden.
3. Landnutzungsbezogene Regenversickerungsstrategien können diese Schutzstrategien unterstützen, müssen aber auf mögliche Zusatznutzen und -kosten bezüglich der regionalen Nachhaltigkeit überprüft werden.

6.4 Erkenntnisse aus den beiden Fallstudien

Mithilfe der beiden Fallstudien haben wir mittels Vor-Ort-Gesprächen mit den zuständigen Behörden und basierend auf hydraulischer Simulation vertieft untersucht, welchen Beitrag zur Schadensreduktion Flächenschutz- und Objektschutzmassnahmen leisten können und welchen Beitrag das Krisenmanagement dazu leisten kann. Dabei haben wir uns in den Fallstudien und insbesondere in den Simulationen auf Starkregen fokussiert. Das Thema Starkregen kam erst in den letzten beiden Jahrzehnten verstärkt ins Bewusstsein der Fachbehörden und der Öffentlichkeit. Das mag damit zu tun haben, dass es in jüngster Zeit zu intensiveren Niederschlägen gekommen ist und Flächenverbrauch und landwirtschaftliche Praktiken und Geräte die Situation verschärft haben. Möglicherweise hat sich der Fokus aber auch deshalb verschoben, da aufgrund der mittlerweile realisierten Massnahmen gegen Flusshochwasser der Oberflächenwasserabfluss aufgrund von Starkniederschlägen eine vermehrte Aufmerksamkeit erhält.

Aus unserer Sicht lassen sich einige wichtige generelle Erkenntnisse aus den beiden Fallstudien im Hinblick auf das Zusammenspiel von präventiven Schutzmassnahmen und im Hinblick auf das Krisenmanagement ableiten.

1. Beide Gebiete haben bedeutende Investitionen in Flächenschutzmassnahmen getätigt. Diese haben sich 2021 als effektiv erwiesen bzw. werden entsprechend ausgebaut. Jedoch bieten Rückhaltebecken nur einen begrenzten Schutz gegen zukünftig mögliche Niederschlagsextreme. Dies zeigen die Simulationen mit einem Klimawandelzuschlag (T=100 Jahre + 15 %).
2. Das Fallbeispiel Valley zeigt, dass Gebiete mit flacher Topografie zu flächigen Überschwemmungen führen können. Dies ist in Menznau weniger ausgeprägt der Fall, aber in vielen Mittellandregionen der Schweiz typisch. In solchen Situationen kann eine landnutzungsbezogene Regenversickerungsstrategien ein mögliches Element sein, um das Gefährdungspotenzial zu reduzieren.
3. Auch wenn die beiden Gebiete im Alpenvorland dank der hohen Durchlässigkeit des Untergrunds nicht mit derart gravierenden Überschwemmungen im Vergleich zum Ahrtal zu rechnen haben, empfehlen wir eine Ergänzung der bestehenden Präventionsanstrengungen in Hinblick auf Starkregen. Die Gefahrenanalysen mittels Simulation können dazu wichtige Grundlagen liefern, bedürfen jedoch einer objektgenauen Ergänzung vor Ort.
4. Die Intensität der Hagelzüge in Menznau und den angrenzenden Regionen zeigen die Grenzen von Präventionsmassnahmen und auch des Krisenmanagements auf. Es ist zu prüfen, ob die personellen und technischen Kapazitäten innerhalb der Region erhöht werden können, um beispielsweise Notdächer in rascher Zeit zu errichten, damit nachfolgender Schaden durch Niederschlag verhindert werden kann.
5. Das Beispiel Menznau zeigt, dass eine rasche überregionale Unterstützung bei grossen Ereignissen wertvoll ist. Im Valley hat dies nur mit beträchtlicher Verzögerung funktioniert. Dennoch bleiben die kurzen Vorwarnzeiten bei Starkregen und Hagel eine Herausforderung für das Krisenmanagement.
6. Integrale Konzepte zum kommunalen Starkregenmanagement könnten Risiken reduzieren, insbesondere wenn sie durch Gefahrenbewusstsein stärkende Massnahmen wie eine “Starkregensprechstunde” oder Ortsbegehungen “von Haus zu Haus” mit Unterstützung der Feuerwehren und anderen Experten im Zuge der Erstellung der Managementpläne einher gehen. Sie sind in der Praxis allerdings noch kaum verbreitet, weil die „Herausforderung Starkregen“ bislang weniger stark im Zentrum der medialen Aufmerksamkeit stand, die Daten dazu erst seit einigen Jahren öffentlich verfügbar sind und die Vorsorge dagegen nicht behördenverbindlich ist.

7 Synthese

7.1 Ziel und Vorgehen

In diesem Kapitel fassen wir die wesentlichen Erkenntnisse aus den Untersuchungen in den vorangehenden Arbeitspaketen im Sinne einer Synthese zusammen. Im Kern geht es dabei um die Frage, welche Lehren die Kantonalen Gebäudeversicherungen (KGV) aus den Ergebnissen dieser Studie ziehen können. Zentral ist dabei, in welchen Bereichen das Zusammenspiel von Prävention, Intervention und Versicherung gut funktioniert hat und in welchen Bereichen Verbesserungspotenziale bestehen. Dabei steht die Wirkung der Prävention im Vordergrund, schwergewichtig der Objektschutz, aber auch ergänzend die Wirkung von Flächenschutzmassnahmen. Zudem nehmen wir Stellung zu den sechs Thesen in der Auftragsausschreibung der Präventionsstiftung (siehe Box unten). In unsere Bewertung fliessen nicht nur die Erfragungen in der Schweiz, sondern auch die Erkenntnisse aus den untersuchten Unwetterereignissen aus Deutschland und Österreich ein.

Die Präventionsstiftung hat im Ausschreibungstext die folgenden sechs Thesen formuliert:

1. Die in den letzten Jahren umgesetzten Präventionsmassnahmen im Flächen- und Objektschutz gegen Hochwasser/Überschwemmung haben das Schadenausmass 2021 substanziell vermindert.
2. Die Alarmierung der breiten Bevölkerung und der Einsatzkräfte hat gut funktioniert.
3. Der rechtzeitige und gezielte Einsatz von mobilen Schutzmassnahmen durch die Einsatzkräfte – dank vorgängiger Einsatzübungen – hat etliche Schäden verhindert.
4. Die Objektschutzmassnahmen gegen Hochwasser/Überschwemmung und Hagel haben ihre Wirksamkeit bewiesen.
5. Die Präventionsmassnahmen gegen Hagel blieben aufgrund der ausserordentlichen Heftigkeit (teilweise Hagelkorndurchmesser von deutlich über 4 cm) teilweise wirkungslos.
6. Das Zusammenspiel von Prävention, Intervention und Versicherung ist eine gute Grundlage, um auch künftige Ereignisse bewältigen und tragen zu können.

Methodisch basieren die in diesem Kapitel formulierten Erkenntnisse und Empfehlungen auf den Ergebnissen der vorangehenden Arbeitsschritte. Folglich sind alle Aussagen mit Bezug auf diese Ergebnisse begründet. Dennoch beinhaltet eine Synthese immer auch eine Bewertung durch die Autoren. Deshalb haben wir unsere Erkenntnisse im Rahmen eines Workshops am 28. Februar 2023 mit den Mitgliedern der Begleitgruppe und mit zusätzlichen Experten diskutiert. Als Experten nahmen die folgenden Personen teil:

– Dr. Michael Bründl, WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF
– Prof. Dr. Michael Kunz, Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Meteorologie und Klimaforschung
– Dipl.-Ing. Hans Starl, Elementarschaden Präventionszentrum, Bereichsleitung Oberösterreich, Linz
– Prof. Dr. Andreas Zischg, Geographisches Institut, Universität Bern, Co-Leiter Mobiliar Lab für Naturrisiken

Die Verantwortung für die Ergebnisse dieser Synthese liegen jedoch einzig bei den Autoren dieser Studie. Dieses Kapitel gliedert sich in zwei Teile. Zunächst präsentieren wir sieben Erkenntnisse und anschliessend finden sich konkrete Empfehlungen an die KGV oder an die Vereinigung Kantonaler Gebäudeversicherungen (VKG).

7.2 Erkenntnisse

Erkenntnis 1
Erfahrungsbasierte Unwetterdiagnosen liefern wichtige Erkenntnisse

Unwetterdiagnosen (auch Gefahrenforensik oder Post Disaster Risk Diagnosis genannt) sind wertvolle Instrumente, um die Ursachen von Unwetterschäden zu analysieren und Stärken und Schwächen bei Prävention, Intervention und Versicherung zu erkennen. Mit der vorliegenden Vergleichsstudie hat die Präventionsstiftung einen solchen Auftrag erteilt. Solche Ex-Post-Diagnosen sollten nach jedem grösseren Schadensfall durchgeführt werden.

Unwetterdiagnosen müssen das Zusammenspiel aus der Intensität des Unwetters und der räumlichen Ausprägung, der Anzahl betroffenen Wertobjekte und der Massnahmen zur Intervention, Prävention und Versicherung berücksichtigen. Nur dann lassen sich schlüssige Aussagen ableiten. Dieses Vorgehen bildete die Basis der vorliegenden Studie. Die verwendete datenbasierte Analyse in Kapitel 3 erlaubt die kombinierte Analyse dieser drei Aspekte. Der grosse Vorteil dieser Analyse liegt darin, dass die Unwetterintensität den Gebäuden zugeordnet und die Wirkung objektbezogener Präventionsmassnahmen präzise (d.h. gebäudegenau) analysiert werden können. Diese datenbasierte Methode stellt einige Anforderungen an die Datenqualität, die es bei den KGV zu verbessern gilt. Vorschläge dazu finden sich in den Empfehlungen.

Unsere differenzierten meteorologischen und hydrologischen Analysen in Kapitel 2 zeigen auf, dass die Unwetterereignisse in der Schweiz von August 2005 und Juli 2021 (Sturmtief «Bernd») nur beschränkt vergleichbar sind. Das Hochwasserereignis 2005 war in Hinblick auf die Niederschlags- und Abflussmengen grösser als das Ereignis 2021. Demgegenüber war der Juni 2021 von sehr intensiven Hagelzügen geprägt, die in einigen Regionen höhere Intensitäten erreichte als in vorangehenden Jahren. Dieses Resultat wurde in der gebäudegenauen Analyse in Kapitel 3 bezüglich Niederschlags und Hagel bestätigt. Hier zeigt sich, wie wertvoll die Kombination der meteorologischen und hydrologischen Analysen mit den gebäudegenauen Auswertungen der Daten der KGV sind.

Der Vergleich der Unwetter 2021 in der Schweiz, Deutschland und Österreich legt nahe, dass die Schweiz weniger stark von «Bernd» betroffen wurde als die Regionen mit hohen Schäden in Deutschland (im Bereich des Ahr/Erftgebietes). Diese Einschätzung basiert nicht auf den absoluten Niederschlagshöhen, sondern auf den Niederschlagsjährlichkeiten.

Die Ereignisanalysen in den Kapiteln 4 bis 6 zeigen Stärken und Schwächen der Präventions- und Interventionsmassnahmen bei den Unwetter 2021 in den verschiedenen Regionen auf. So stellten wir in Kapitel 4 dar, welche fatalen Konsequenzen die Störungen in der Alarmierungskette im Ahrtal hatte. Im österreichischen Mittersill funktionierten die Prognosen, Schutzmassnahmen und Abläufe. Trotzdem kamen die Entscheidungsträger zum Schluss, dass der bisherige Hochwasserschutz in Zukunft möglicherweise (nicht zuletzt wegen klimabedingter Veränderung der klimabedingten Naturgefahren) nicht ausreicht. In Tirol bewährte sich die gute Vorbereitung der Einsatzorganisationen aufgrund vergangener Ereignisse. Auch erwies sich die staatliche Vor- und Nachsorge (durch die Abteilung Wasserwirtschaft) als wirksam.

Erkenntnis 2
Das Zusammenspiel von Prävention, Intervention und Versicherung ist eine gute Grundlage, um auch künftige Ereignisse bewältigen und tragen zu können.

Das Konzept der Verbindung von Prävention, Intervention und Versicherung in der Schweiz hat sich bei den Unwettern 2021 bewährt. Insoweit bestätigen sich die Ergebnisse der 5. Ausschreibung der Präventionsstiftung (Raschky et al., 2009) und unterstützt die These 6 der Präventionsstiftung. Das wirkungsvolle Zusammenspiel zeigte sich besonders deutlich in der Fallstudie zu Menznau. Das starke Engagement der

Gebäudeversicherung Luzern in allen drei Bereichen schafft Verbundvorteile. Das wirksame Krisenmanagement und die rasche Erstellung von Schutzdächern reduzierten die Schäden. Zudem liegen die Erkenntnisse aus einem Unwetterereignis den Gebäudeversicherungen zeitnah vor und können für die Prävention genutzt werden. Aber die grossen Hagelschäden brachten die Regionen bei deren Bewältigung an die Kapazitätsgrenzen. Die Unterstützung seitens der Gebäudeversicherung Luzern bei überregionalen oder grossen Ereignissen (z.B. durch Katastropheneinsatzleiter) war 2021 wichtig und hat funktioniert.

Die Beobachtungen in Deutschland und Österreich zeigen deutlich die Nachteile auf, wenn Prävention, Intervention und Versicherung nicht von einer Institution im Verbund wahrgenommen werden. So verzögert sich der Wiederaufbau im Ahrtal durch konkurrierende staatliche Beihilfen und private Versicherungen. Verglichen mit der Schweiz fehlt in Österreich ein Anreizsystem zur privaten Vorsorge. Der österreichische Katastrophenfond ist eine steuerfinanzierte staatliche Leistung, mit der Schäden durch Naturkatastrophen bis zu einem festgelegten Höchstbetrag ersetzt werden, wenn und sofern der Geschädigte nicht privat versichert ist. So waren in der stark von Überschwemmung betroffenen Gemeinde Kothbach (Österreich) nur wenige Personen versichert. Die Schadensbewältigung erfolgte durch Spendengelder sowie den Katastrophenfonds. Dabei wurden 60-70 % der Schäden übernommen. In Tirol deckt der Katastrophenfonds maximal 50 % der Kosten, solange ausreichen Mittel im Fonds sind. Solche Regeln führen nicht nur zu empfindlichen Vermögensverlusten bei den Gebäudeeigentümern, sondern verzögern auch den Wiederaufbau.

Erkenntnis 3

Die in den letzten Jahren umgesetzten Präventionsmassnahmen im Flächen- und Objektschutz gegen Hochwasser/Überschwemmung haben das Schadenausmass 2021 substanziell vermindert.

Die Studienergebnisse bestätigen diese Aussage und validieren damit die These 1 der Präventionsstiftung. Jedoch gilt es einzuschränken, dass die Unwetter 2021 in der Schweiz bezüglich langanhaltenden Niederschlags weniger stark waren als im Jahr 2005. Das belegen die tieferen Pegelstände (Jährlichkeiten) der wichtigsten Flüsse im Jahr 2021 im Vergleich zu 2005.

Die gebäudegenauen Analysen in Kapitel 3 weisen die Wirkung der Objektschutzmassnahmen gegen Überschwemmungen nach. Solche Massnahmen reduzieren die Wahrscheinlichkeit, dass ein Schaden auftritt, teilweise um die Hälfte. Das ist eine beachtliche Wirkung. Die Wirkung ist bei tieferen Niederschlagsintensitäten grösser als bei hohen Intensitäten. Das ist wenig überraschend, denn solche Massnahmen schützen meist nur bis zu einer gewissen Höhe der Überflutung. Die Simulationen für die beiden Fallstudien zeigen, dass bei Starkregen viele Gebäude Überflutungen von unter 50 cm ausgesetzt sind. Das weist darauf hin, dass in solchen Fällen ein Schutz durch Objektschutzmassnahmen möglich ist.

Die Wirkung von Flächenschutzmassnahmen wurde in den Fallstudien untersucht. Im Beispiel Menznau zeigen sowohl die Erfahrung des Krisenstabs als auch die Ergebnisse der Simulation die Wirksamkeit der Flächenschutzmassnahmen. Mit den Simulationen konnten wir auch die Grenze der Schutzwirkung ausloten. Das Hochwasserrückhaltebecken am Rickenbach beispielsweise ist bis zu einem Starkniederschlag mit einer Jährlichkeit von 100 Jahren wirksam. Erst bei einem Zuschlag von 15 %, begründet mit dem Klimawandel, kommt es zu einem Überlaufen. Ähnliche Ergebnisse konnten wir auch für die Gemeinde Valley nachweisen, wo sich der im Jahr 2018 (nach den Unwettern 2016) beschlossene Kapazitätsausbau der Rückhaltebecken sich in Simulationen robust bis HQ100 erweist.

Aber auch die Analysen in Kapitel 3 weisen indirekt auf die Wirkung von Flächenschutzmassnahmen hin. So fielen im Jahr 2021 im Kanton Luzern wesentlich tiefere Überschwemmungskosten bei Gebäuden an, die einem langanhaltenden Niederschlag (Dauer von 24 Stunden und Jährlichkeit zwischen 2 und 10 Jahren) ausgesetzt waren als 2005. Schliesslich zeigen auch die Erfahrungen in Österreich, dass die nach den Ereignissen 2005 und 2014 im Oberpinzgau gesetzten Hochwasserschutzmassahmen wirkten und grössere Schäden im Juli 2021 abwenden konnten.

Erkenntnis 4

Die Objektschutzmassnahmen gegen Hagel sind wirksam, aber kommen bei ausserordentlich starkem Hagel an ihre Grenzen.

Die gebäudegenauen Analysen in Kapitel 3 bestätigen die Wirkung der Objektschutzmassnahmen gegen Hagel in den Kantonen Aargau und Zürich und unterstützen die Thesen 4 und 5 der Präventionsstiftung. Aufgrund der kleinen Anzahl von Massnahmen im Kanton Luzern war es nicht möglich, die Wirkung dort zu prüfen, was angesichts der hohen Hagelschäden in diesem Kanton bedeutsam wäre. Auch konnten wir aufgrund fehlender systematischer Information nicht prüfen, welche Massnahmen besonders wirksam sind. Aber es dürfte sich im Wesentlichen um die automatische Steuerung der Storen handeln, die rechtzeitig hochgezogen werden, wenn Hagel droht. Darauf weisen auch die Ergebnisse der 9. Ausschreibung (Röthlisberger et al. (2017)) hin.

Gemäss unseren Berechnungen reduzieren diese Massnahme bei kleinem Hagel die Wahrscheinlichkeit eines Schadens deutlich (um ca. 20 bis 25 %-Punkte). Damit erweist sich diese Massnahme bei häufigsten Ereignissen als wirksam. Bei mittlerer und grosser Hagelintensität nimmt die Wirksamkeit stark ab. Die Erfahrungen aus Luzern zeigen, dass 2021 hohe Schäden bei grossem Hagel entstanden sind, weil es zu Wassereinbruch über die zerstörten Dächer gekommen ist. Umso wichtiger ist es, dass die gesamte Gebäudehülle und besonders die Dächer einen ausreichenden Hagelwiderstand aufweisen.

Seit 2012 sind strengere Baunormen bezüglich Hagelwiderstand in Kraft. Deren Wirksamkeit lässt sich empirisch noch nicht abschliessend beurteilen. In unsere Analysen ist die Schadenswahrscheinlichkeit bei neueren Gebäuden (Baujahr 2012 oder später) nicht statistisch signifikant tiefer als bei älteren Liegenschaften.

Erkenntnis 5

Die Alarmierung der Einsatzkräfte hat gut funktioniert.

Die rechtzeitige Vorhersage, Alarmierung der Einsatzkräfte und falls nötig der Bevölkerung sind bei grossen Überschwemmungen entscheidend. Das zeigen die Erfahrungen im Ahrtal. In den untersuchten Gebieten der Schweiz war die Situation nicht mit jener im Ahrtal vergleichbar. Es waren keine bedeutenden: Evakuierungen der Bevölkerung notwendig. Im untersuchten Gebiet des Kantons Luzern funktionierte die Informations- und Alarmkette zu den Einsatzkräften gut. Die These 2 der Präventionsstiftung kann also bezüglich Einsatzkräfte bestätigt werden. Eine Alarmierung der Bevölkerung war nicht nötig.

Die Fallstudie Menznau weist im Weiteren darauf hin, dass die überregionale Koordination und der Einsatz eines regionalen Krisenstabs wichtig waren und gut funktionierten. Information und Alarmierung der Einsatzkräfte waren gut eingespielt. Die Zusammenarbeit zwischen den kantonalen Stellen und den lokalen Einsatzkräfte hatte sich bewährt.

Die Erfahrungen in Deutschland waren weniger positiv. In Valley kam es zu mehrstündigen Verspätungen beim Einsatz überregionaler Einsatz- und Hilfskräfte durch langwierige Prozeduren beim Übergang der Einsatzführung auf höhere Ebenen. Im Ahrtal zeigte sich, dass zu späte und unklare Information der Bevölkerung gravierende Auswirkungen (Todesfälle) zur Folge hatte. Demgegenüber hat in Salzburg und Tirol die Alarmierungskette gut funktioniert.

Erkenntnis 6

Der Einsatz von mobilen Schutzmassnahmen durch die Einsatzkräfte hat etliche Schäden verhindert.

Die Rückmeldungen aus dem Kanton Luzern zeigen, dass mobile Schutzmassnahmen rechtzeitig installiert waren und etliche Schäden verhinderten. Das bestätigt die These 3 der Präventionsstiftung.

So bewährte sich in Menznau die Notfallplanung, die durch die Gebäudeversicherung Luzern initiiert und finanziert wurde. Deren Umsetzung wird regelmässig geübt und alle Massnahmen waren rechtzeitig erstellt. Auch die Beaverschläuche in der Stadt Luzern wurden rechtzeitig installiert und waren wirksam, jedoch entstanden dennoch aufgrund des Wasserdrucks von unten Schäden in den Gebäuden. Mobile Schutzmassnahmen haben aber eine begrenzte Wirkung bei Hagel und Starkregen. In diesen Fällen sind die Vorwarnzeiten sehr kurz und es ist kaum möglich temporäre Schutzmassnahmen zu installieren.

Durch rasches und kompetentes Handeln der Einsatzkräfte können die Schäden deutlich reduziert werden. Darauf weisen auch die Erfahrungen im Oberpinzgau (Österreich) hin. Die Unwetter im Juli 2021 wurden dort gut bewältigt, weil die Einsatzkräfte eingeübt waren und rasch intervenieren und Schutzmassnahmen ergreifen konnten. Demgegenüber fehlten in Valley Sandsäcke und die überregionalen Einsatzkräfte trafen mit Verspätung ein. Das führte dazu, dass die Bevölkerung sich mit notdürftigen Wasserbarrieren in der Krisenlage schützen musste. Nach dem Unwetter 2021 wurden Verschläge mit Sandsäcken in der Gemeinde errichtet.

Erkenntnis 7
Schutzstrategien gegen Starkregen und Hagel werden wichtiger.

Bestehende Präventionsmassnahmen sind stark auf Überschwemmungen aufgrund langandauernden Niederschlags ausgerichtet. Jedoch bieten diese Massnahmen nur begrenzten Schutz gegen Starkregen und Hagel. Solche Ereignisse werden möglicherweise mit dem Klimawandel häufiger und stärker. Deshalb sind Schutzstrategien gegen Starkregen und Hagel systematisch zu überprüfen und wo nötig auszubauen.

Die Analysen in Kapitel 3 zeigen, dass die Schäden durch intensiven Hagel stark zugenommen haben. Möglicherweise führte die Kombination von Hagel und Starkregen zu diesem Anstieg. Auch zeigt die Fallstudie Menznau und Valley, dass das Krisenmanagement bei Starkregen und Hagel schwierig ist, da sehr kurze Vorwarnzeiten bestehen. Die sehr kurzfristigen lokalen Prognosen erfordern eine sehr schnelle Alarmierungskette und Katastrophenbewältigung. Das Krisenmanagement ist gefordert, da es auf die zahlreichen Meldungen aus der Bevölkerung reagieren muss. Die hydrodynamischen Simulationen in Menznau und Valley legen nahe, dass es bei Starkniederschlag bereits bei einer Jährlichkeit von 30 Jahren zu Wassertiefen an den Gebäuden von 25 bis 50 cm kommt, obwohl die Rückhaltebecken ihre Funktion erfüllen. In flachen Gebieten spielt zudem die Versickerung eine wichtige Rolle. Ist die Versickerung aufgrund der Versiegelung und des Einsatzes schwerer Geräte auf den Feldern oder wegen fehlender Randbepflanzung gering, steigen die Überflutungsrisiken bei Starkregen.

7.3 Empfehlungen

Aus den Erkenntnissen dieser Studien leiten wir 10 konkrete Empfehlungen zuhanden der Gebäudeversicherungen ab. Diese betreffen drei Bereiche, den Ausbau der Unwetterdiagnose, die Optimierungen bei Prävention, Intervention und Versicherung und den Ausbau der Schutzstrategien gegen Starkregen und Hagel.

7.3.1 Ausbau der Unwetterdiagnosen

Empfehlung 1

Nach jedem grösseren Unwetter empfehlen wir, eine standardisierte Unwetterdiagnose (oder Ereignisdokumentation) durchzuführen, wie dies die Präventionsstiftung bezüglich der Unwetter 2021 veranlasst hat. Mit «standardisiert» meinen wir, dass solche Analysen einem klaren methodischen Vorgehen folgen

und die vorhandenen Gebäudedaten optimal einsetzen sollten (mehr dazu in Empfehlung 2). Wir sind der Ansicht, dass mit den Klimaänderungen die Wahrscheinlichkeit von extremen Wetterereignissen steigt. Somit wird umso wichtiger, mit einer zeitnahen Analyse rasch die Lehren für Prävention und Intervention ziehen zu können.

Empfehlung 2

Wir empfehlen der VDK, gemeinsam mit Hochschulinstituten und interessierten KGVs ein Pilotprojekt zu starten, in welchem ein Tool zur Datenerfassung, Datenaufbereitung und Datenanalyse entwickelt wird. Es ist zu prüfen, ob ein solches Projekt teilweise über Innosuisse finanziert werden könnte. Denn die KGV haben wertvolle Daten, die zur Analyse eingesetzt werden könnten, aber heute nur schwer nutzbar sind. Damit diese Daten gut verwendbar werden, müssen sie systematisch erfasst und in auswertbarer Form aufbereitet werden (Details in AP2 beschrieben). Wir sind der Ansicht, dass die VKG die KGV bei der Erschliessung des Datenschatzes unterstützen sollte, da es Verbundvorteile gibt bei der Entwicklung solcher Tools und der Aufwand für kleine KGVs möglicherweise zu gross ist.

Mit einem solchen Tool könnte die Empfehlung 1 einfacher umgesetzt werden. Wenn die Daten systematisch erfasst und aufbereitet sind, lassen sich aktuelle Unwetterereignisse mit modernen datenbasierten Methoden mit vertretbarem Aufwand analysieren. Wenn es zudem gelingt, die verschiedenen Massnahmen und Gebäudeeigenschaften systematischer und detaillierter zu erfassen, lassen sich reichhaltigere Erkenntnisse gewinnen, als dies in dieser Studie möglich war.

Empfehlung 3

Wir empfehlen der Präventionsstiftung, sich dafür einzusetzen, dass die Qualität der Hageldaten verbessert wird. Die gegenwärtigen, auf Radarmessungen basierenden Hageldaten sind Schätzungen und reduzieren die Genauigkeit gebäudegenauer Analysen. Zurzeit laufen Forschungsprojekte (z.B. das SNF-Projekt scClim), die unter anderem mit Hilfe der Daten aus der Bevölkerung via App der MeteoSchweiz versuchen, die Datenqualität zu verbessern. Wir empfehlen diese Anstrengungen zu unterstützen, beispielsweise bei der Beschaffung differenzierter Daten zu Hagel (Grösse, Dauer, Schäden).

7.3.2 Optimierung bei Prävention, Intervention und Versicherung

Empfehlung 4

Intensive Hagelzüge zeigen die Grenzen von Präventionsmassnahmen und des Krisenmanagements auf. Es ist zu prüfen, ob die personellen und technischen Kapazitäten Regionen übergreifend erhöht werden können. Bei der Schadensabwicklung finden solche Kooperationen zwischen den KGV bereits statt. Wir empfehlen zu prüfen, ob solche Kooperationen auch bei der unmittelbaren Krisenbewältigung sinnvoll sein können.

Empfehlung 5

KGV sollen sich dafür einsetzen, dass Schutzmassnahmen möglichst rasch nach den Ereignissen geplant und umgesetzt werden. Denn das Umsetzen von Objektschutz- und Flächenschutzmassnahmen ist in der Regel in einem kurzen Zeitraum nach den Ereignissen vereinfacht möglich. Dann sind die Grundeigentümer und die Bevölkerung für diese Anliegen sensibilisiert.

Empfehlung 6

Die KGV sollen sich weiterhin dafür einsetzen, dass die Kriterien des Schutzes vor Naturgefahren in den kantonalen und kommunalen Baugesetzen streng bleiben oder werden und dass die KGV Baugesuche in

Gefahrenzonen prüfen und verbindliche Auflagen verlangen können. Diese Lobbyfunktion für den Schutz gegen Naturgefahren bleibt eine wichtige Daueraufgabe der KGV.

7.3.3 Ausbau der Schutzstrategien gegen Starkregen und Hagel

Empfehlung 7

Die KGV sollten die Vorsorge gegen Starkregen und Hagel weiter vorantreiben. Wir empfehlen bestehende integrale Risikomanagementkonzepte zu überprüfen und hinsichtlich der Gefahr von Starkregen und Hagel zu ergänzen. Dabei sind alle Verantwortungsträger einzubinden und alle Arten von Massnahmen einzubeziehen. Wichtig ist auch eine regional abgestimmte Bearbeitung. Wir empfehlen zudem zu berücksichtigen, dass der Klimawandel die Intensität der Unwetter verändern kann.

Empfehlung 8

Wir empfehlen den KGV, Objektschutzmassnahmen gegen Hagel prioritär auszubauen. Dabei ist zu prüfen, ob neben dem Storenschutz andere Massnahmen kosteneffizient sind, die den Schutz der Gebäudehülle verbessern. Interessante Hinweise liefert die Dissertation von Starl (2023), die insbesondere Vorschläge zur Verbesserung des Unterdachs aufzeigt.

Empfehlung 9

Wir empfehlen den KGV, besonders gefährdete Gemeinden zu unterstützen, eine systematische Gefahrenanalyse gegen Starkregen durchzuführen. Eine Gefahrenanalyse mittels Simulation, wie in AP5 eingesetzt, kann ein wichtiges Element einer solchen Strategie sein. Sie ermöglicht die integrative Schutzwirkung bestehender und zusätzlicher Schutzmassnahmen einfach und anschaulich zu evaluieren. Dieses Instrument bedarf jedoch einer objektgenauen Ergänzung vor Ort. Darüber hinaus sollen KGV Gemeinden und Kantone darauf hinwirken, dass beispielsweise Flächenschutz (Versickerungsstrategien) und der Murenschutz verstärkt einbezogen werden.

Empfehlung 10

Wir empfehlen den KGV, die Objektschutzmassnahmen gegen Oberflächenwasser verstärkt zu prüfen und deren Umsetzung zu fördern. Die hydrodynamischen Simulationen in Menznau und Valley zeigen, dass bei Starkniederschlag ein grosser Teil der Gebäude in den Untersuchungsgebieten von pluvialem Hochwasser betroffen ist, die jedoch in der Regel einen Wasserstand kleiner als 50 cm aufweisen. Damit dürften bei einem Grossteil der betroffenen Gebäuden bauliche Massnahmen möglich und effektiv sein.

8 Anhang

8.1 Anhang zu Kapitel 2

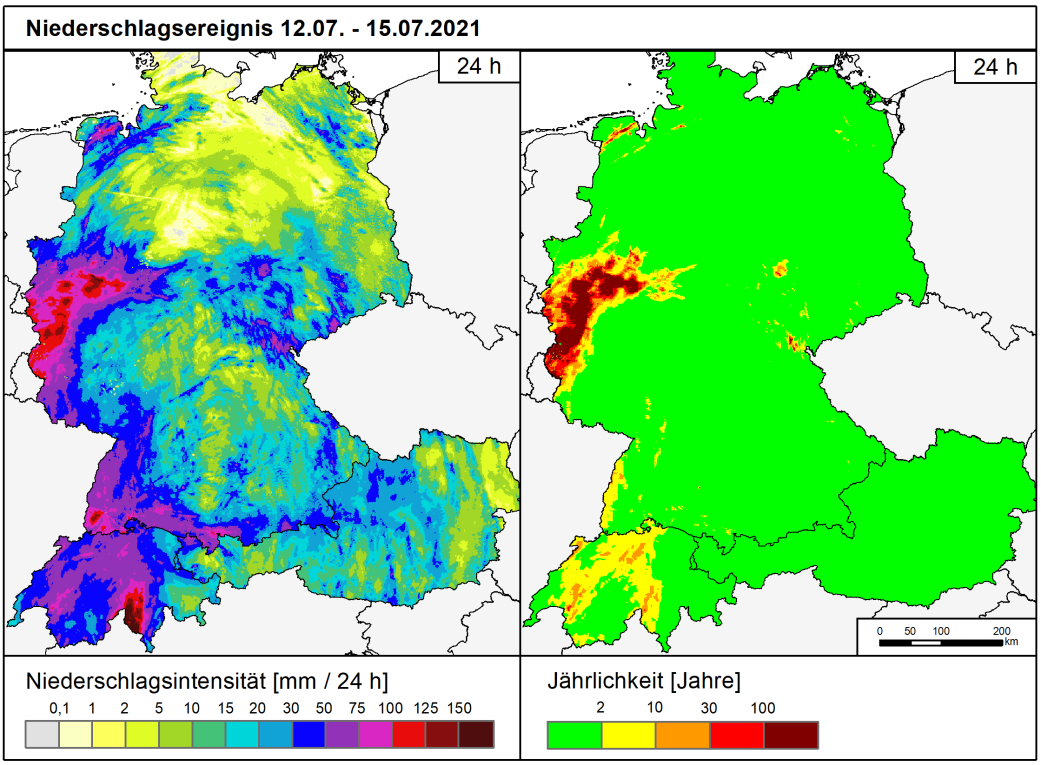


Abbildung 44: Niederschlagsintensität (links) und korrespondierende Jährlichkeit (rechts) für das Sturmtief «Bernd» vom 12.-15.07.2021 (24 Stunden) für die Schweiz, Österreich und Deutschland

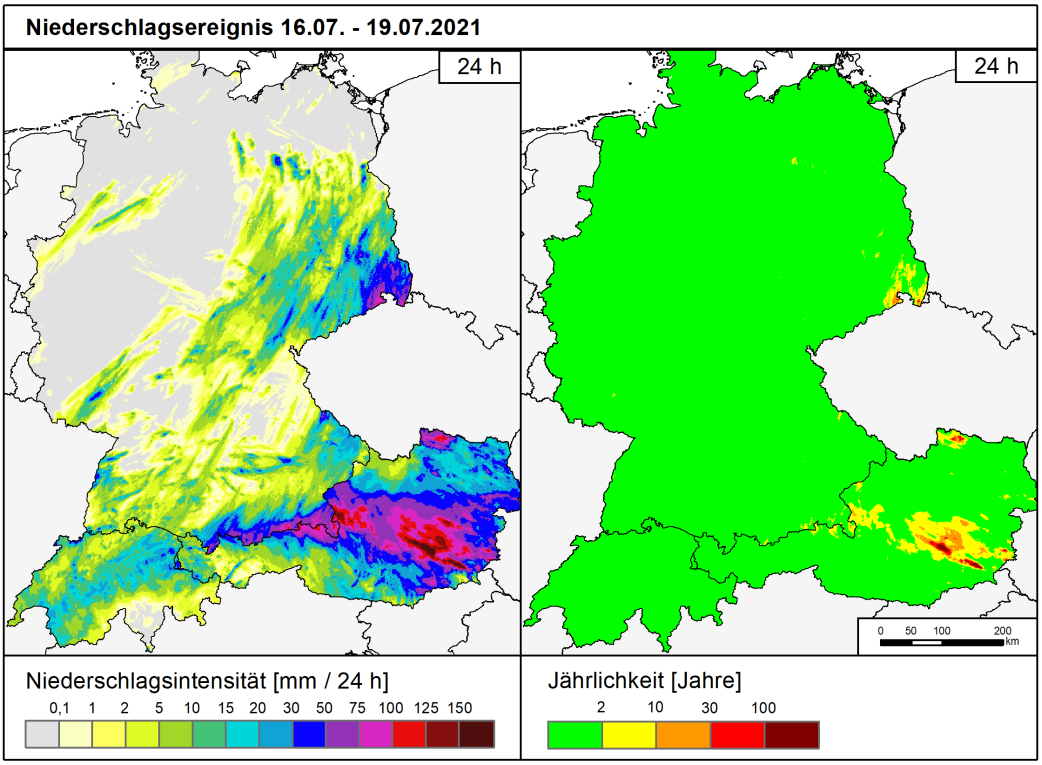


Abbildung 45: Niederschlagsintensität (links) und korrespondierende Jährlichkeit (rechts) für das Sturmtief «Bernd» vom 16.-19.07.2021 (24 Stunden) für die Schweiz, Österreich und Deutschland

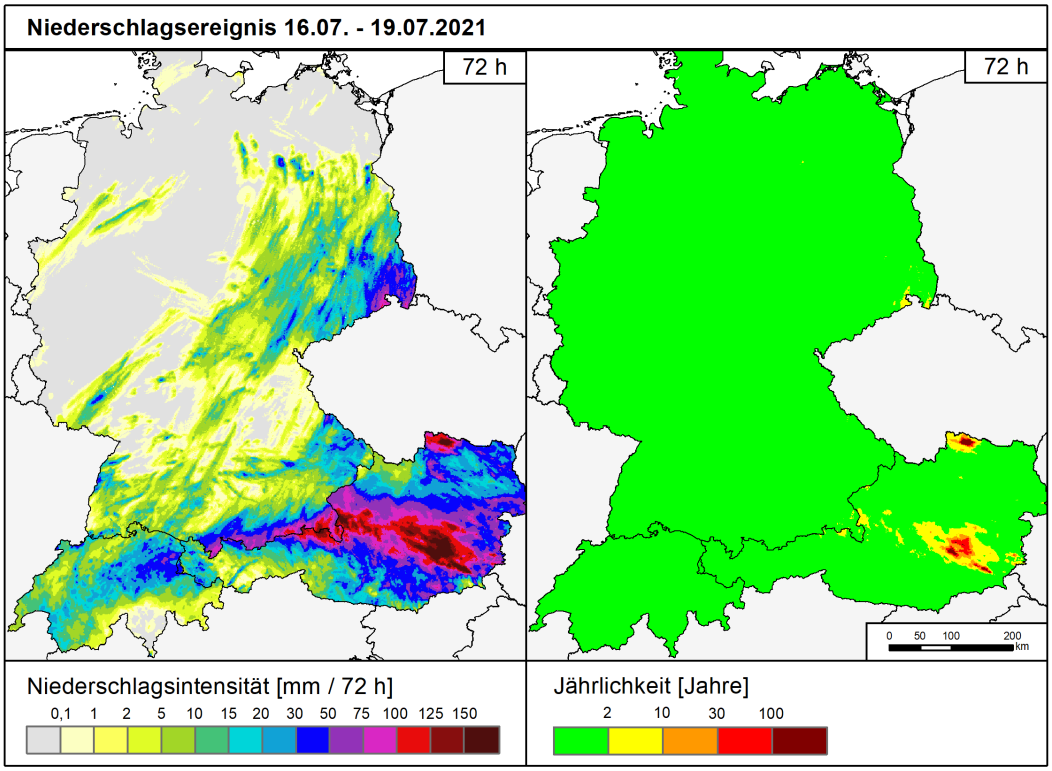


Abbildung 46: Niederschlagsintensität (links) und korrespondierende Jährlichkeit (rechts) für das Sturmtief «Bernd» vom 16.-19.07.2021 (72 Stunden) für die Schweiz, Österreich und Deutschland
Quellen: eigene Darstellung; Datenquellen vgl. Tabelle 1.

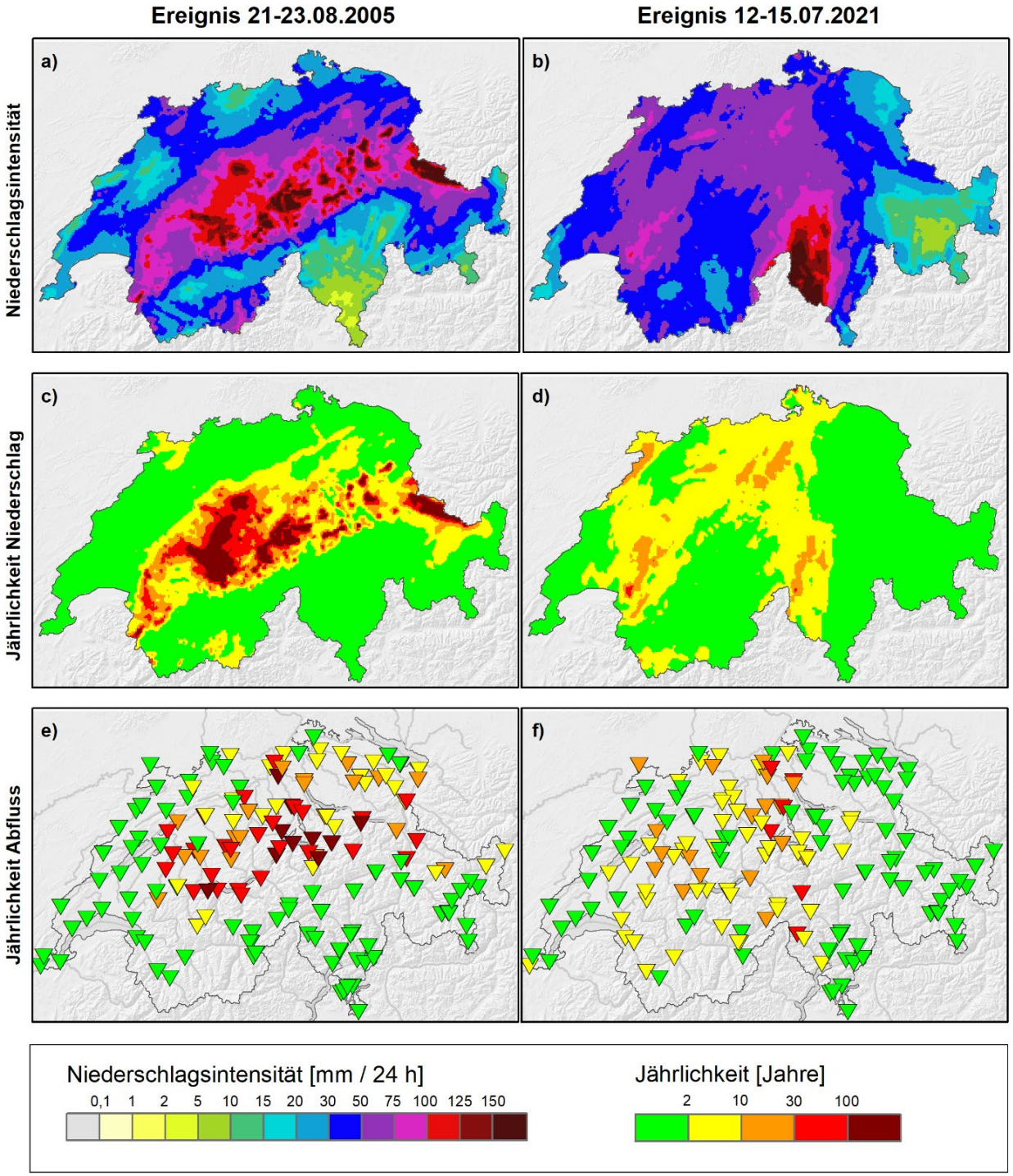


Abbildung 47: Vergleich der 24 Stunden Niederschlagsintensität

Erläuterungen: (a,b), der korrespondierende Jährlichkeit des Niederschlags (c,d) und der Jährlichkeit des gemessenen Abflusses an den Pegeln (e,f) für das Ereignis im August 2005 und Juli 2021. Quellen: eigene Darstellung; Datenquellen: vgl. Tabelle 1, BAFU 2022b).

8.2 Anhang zu Kapitel 3

8.2.1 Datenaufbereitung und Datenanforderungen

Die Auswertungen basieren auf einer Kombination von sechs verschiedenen Datenbanken:

- Datenbank zu den objektbezogenen Daten der jeweiligen Gebäudeversicherung
- Datenbank zu den Schadensangaben pro Objekt der jeweiligen Gebäudeversicherung
- Datenbank zu den Massnahmen pro Objekt der jeweiligen Gebäudeversicherung
- Zwei Datenbanken zu den Wetterereignissen für Hagel und Niederschlag von MeteoSchweiz
- Datenbank zum Baukostenindex der Regionen des Bundesamtes für Statistik.

In einem ersten Schritt wurden die drei Datenbanken der Gebäudeversicherungen anhand der Policen- oder Versicherungsnummer verknüpft. Zusätzlich wurde der Wert der Objekte anhand des Baukostenindexes für die verschiedenen Jahre angepasst. In einem zweiten Schritt wurden die Wetterereignisse (Hagel und Niederschlag), die als Rasterdaten mit einer Kantenlänge von einem Kilometer vorliegen, den Objekten anhand der Koordinaten zugeordnet. Einige Gebäudeversicherungen konnten keine Objektkoordinaten liefern. In diesen Fällen mussten die Adressdaten mit einer speziellen Software in Objektkoordinaten umgewandelt werden.

Diese Kombination von verschiedenen Datenbanken stellt hohe Anforderungen an die Datenqualität, damit einfach, effizient und produktiv mit den Daten gearbeitet werden kann. Hier sind einige Anforderungen an das Datenformat beispielhaft aufgeführt:

- Die drei Datenbanken sollten den gleichen Namen für denselben Indikator verwenden. So sollte die Versicherungsnummer in allen Datenbanken mit demselben Namen bezeichnet sein.
- Die Adressangaben sollten separat für Name, Hausnummer, Ort, und PLZ eingetragen sein. Sind diese Angaben als Lauftext, allenfalls mit Kommas getrennt, erfasst, erschwert das eine maschinelle Auswertung.
- Daten zu den Massnahmen sind häufig in einem Tabellenblatt pro Jahr erfasst. Wichtig ist, dass jedes Tabellenblatt das identische Format aufweist.
- Wenn eine Massnahme für verschiedene Gebäude mit unterschiedlichen Versicherungsnummern (z.B. Reiheneinfamilienhäuser) umgesetzt wird, sollte sie für jedes Objekt in einer separaten Zelle erfasst werden.
- Das Datum (etwa bei Massnahmen oder Schadensfällen) sollte überall in demselben Format erfasst sein. Vorzugsweise werden Tag, Monat und Jahr in separaten Zellen festgehalten.

Darüber hinaus würden statistische Auswertungen durch die systematische Erfassung von Informationen zum Objekt oder zu den ergriffenen Massnahmen erleichtert. Dazu finden sich wertvolle Empfehlungen bereits im Bericht zur 9. Ausschreibung der Präventionsstiftung (vgl. Locher et al. 2017, S. 6–7). Dort wird eine einheitliche Datenerfassung durch die KGV mit hoher räumlicher Auflösung (Gebäudekoordinaten) und eine periodische Erfassung der Präventionsmassnahmen empfohlen. Um qualitative und hochwertige Auswertungen über die Wirkung dieser Massnahmen durchführen zu können, sollten die Massnahmen in einem systematischen Format erfasst sein. Häufig sind ausführliche Informationen als nicht standardisierter Text vorhanden. Diese sind schwierig automatisch auswertbar. Für eine Auswertung hilfreich ist die Nutzung von Kategorien. Teilweise verwenden Gebäudeversicherungen bereits solche Kategorien, etwa bei der Zuordnung, gegen welches Unwetter eine Massnahme schützen soll.

Die Analysen könnten ebenfalls verfeinert werden, wenn zusätzliche objektbezogene Informationen verfügbar wären. Heute beschränken sich diese Informationen weitgehend auf Versicherungswert, Gebäudeart, Volumen etc. Im Hinblick auf die Analyse von Hagelschäden wäre es beispielsweise wertvoll zu wissen, ob ein Objekt besondere Risiken wie Dachfenster oder Solaranlagen aufweist.

8.2.2 Detaillierte Ergebnisse zur Betroffenheit durch Niederschlag 2005 und 2021 im Kanton Luzern

In den folgenden beiden Tabellen sind die detaillierten Resultate für den Kanton Luzern dargestellt, welche Gebäude von welcher Niederschlagsintensität im August 2021 und im Juli 2005 betroffen waren. Die Niederschlagsintensität wird gemessen durch die Jährlichkeiten für die verschiedenen Dauerstufen (1 h, 6 h, 12 h, 24 h und 72 h). So bezeichnet das Ereignis «0-2-10-10-2» Niederschlag mit Jährlichkeiten von kleiner 2 Jahre für die Dauerstufe 1 h, von 2 bis 10 für die Dauerstufen 6 und 72 h, und Jährlichkeiten von 10 bis 30 Jahren für die Dauerstufen 12 und 24 h. Die Betroffenheit ist gemessen mit der Anzahl Gebäude und deren Versicherungswert. Ausgewiesen sind auch die Schäden (Summe und Schaden pro Mio. Versicherungswert) bei den von einer bestimmten Niederschlagsintensität betroffenen Gebäuden.

Tabelle 15: Betroffenheit und Schäden durch Niederschlag 2021 im Kanton Luzern

Niederschlags-intensität	Anzahl Objekte	Versicherungswert in Mio. CHF	Überschwemmungs-schaden in CHF	Schaden pro Mio. CHF ausgesetz-tem Versicherungswert in CHF
0-0-0-0-2	104	118.1	0	0.0
0-0-0-2-0	920	1’691.7	65’799	38.9
0-0-0-2-2	13449	36’486.2	70’711	1.9
0-0-2-2-0	37	29.4	0	0.0
0-0-2-2-2	7920	10’959.6	275’192	25.1
0-2-0-0-0	2639	4’596.6	20’756	4.5
0-2-0-2-0	14	19.1	0	0.0
0-0-2-10-2	2183	2’949.3	176’146	59.7
0-2-2-0-0	70	48.5	12’500	257.8
0-2-2-2-0	42	28.2	12’940	458.8
0-2-2-2-2	21	14.4	28’036	1’944.2
0-2-2-10-2	259	682.3	462’533	677.9
0-2-2-30-10	21	32.3	0	0.0
2-0-0-0-0	9465	20’595.1	5’251’724	255.0
2-2-0-0-0	463	921.9	750’721	814.3
2-2-0-2-0	56	70.9	0	0.0
2-2-2-0-0	35	80.1	0	0.0
2-2-2-2-0	329	226.9	8’000	35.3
2-0-2-10-2	78	58.9	11’480	195.0
2-2-2-10-2	413	576.9	200’014	346.7
2-2-2-30-2	28	20.6	1’000	48.6
2-0-10-10-2	38	59.0	0	0.0
2-2-10-10-2	197	239.3	873’674	3’650.6
2-2-2-30-10	14	17.4	9’500	547.5
2-10-10-30-2	315	533.0	974’891	1’829.1
2-10-10-30-10	14	13.1	10’000	761.5
2-30-10-30-10	28	51.9	95’500	1’840.1
2-10-10-100-10	98	70.4	85’351	1’212.3
2-30-10-100-10	406	528.9	1’215’352	2’297.7
2-30-30-100-10	161	292.1	787’336	2’695.6
10-30-30-100-10	49	47.8	42’026	878.6

Tabelle 16: Betroffenheit und Schäden durch Niederschlag 2005 im Kanton Luzern

Niederschlags-intensität	Anzahl Objekte	Versicherungswert in CHF	Überschwemmungs-schaden in CHF	Schaden pro Mio. CHF ausgesetz-tem Versicherungswert in CHF
0-0-0-2-0	4305	7'779.1	54'289'117	6'978.9
0-0-0-2-2	777	1'094.3	279'945	255.8
0-0-0-10-2	469	423.5	558'155	1'317.9
0-0-0-2-10	14	10.7	17'768	1'667.3
0-0-2-2-0	6027	11'064.7	78'432'682	7'088.6
0-0-2-2-2	1694	2'107.6	4'826'806	2'290.2
0-0-2-10-2	812	1'216.9	5'791'869	4'759.7
0-0-2-2-10	7	4.3	0	0.0
0-2-2-2-0	623	925.3	470'946	509.0
0-2-2-2-2	5005	7'904.6	25'661'947	3'246.5
0-0-2-30-2	7	3.5	1'385	398.8
0-0-2-10-10	280	362.5	981'138	2'706.9
0-2-2-10-2	4669	9'221.7	9'818'922	1'064.8
0-2-2-30-2	7	3.4	0	0.0
0-2-10-10-2	1351	12'899.5	7'460'293	578.3
0-2-2-10-10	546	515.1	614'984	1'194.0
0-2-2-10-30	14	8.4	14'690	1'753.5
0-2-2-30-10	525	675.5	1'478'029	2'188.1
0-2-2-30-30	336	285.8	507'483	1'775.6
0-2-10-10-10	7	8.7	9'258	1'064.0
0-2-10-30-10	14	5.9	6'765	1'138.2
0-2-10-30-30	77	41.8	17'941	429.1
0-2-2-100-10	35	42.3	63'536	1'501.2
0-2-10-100-10	7	15.0	0	0.0
0-2-10-100-30	49	55.9	17'072	305.2

8.2.3 Ergebnisse der Logit-Regressionen

In Tabelle 17 sind die Ergebnisse der Logit-Regression für Hagel (Zürich und Aargau) wiedergegeben. Die abhängige Variable «Schaden» hat den Wert 0, wenn das Objekt keinen Schaden aufweist, andernfalls den Wert 1. Die unabhängigen Variablen sind

– Massnahme (0: keine Massnahme; 1: Massnahme),
– Hagelgrösse, die dieses Objekt im entsprechenden Jahr maximal ausgesetzt war: 1 bis 6.

Wir verwenden einen Logit-Schätzer mit «time fixed effects». Dieser erlaubt uns, den Einfluss von zeitlich unveränderten Eigenschaften der Gebäude (Orte, Gebäudemerkmale und Objekttypen) zu berücksichtigen und dadurch unverzerrte oder korrekte Koeffizienten zu schätzen.

Interpretation der Resultate in Tabelle 17: Objekte mit Massnahmen haben eine signifikant tiefere Schadenswahrscheinlichkeit (Koeffizient ist kleiner als 1). Die Hagelgrösse hat einen positiven Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit (Koeffizient ist grösser als 1). Die Stärke der Wirkung ist im Haupttext erläutert.

Tabelle 17: Regressionsresultate für Hagelschäden für die Kantone Zürich und Aargau

Abhängige Variable: Schaden	**ZH**	**AG**
Massnahme = 1	0.247***	0.218***
	(0.0983)	(0.0750)
Hagelgrösse	2.987***	3.047***
	(0.00808)	(0.0109)
Zeitliche fixe Effekte	Ja	Ja
PLZ fixe Effekte	Ja	Ja
Gebäude fixe Effekte	Ja	Ja
Objekttyp fixe Effekte	Ja	Ja
Beobachtungen	5,125,772	2,810,730
Anzahl Objekte	46,264	29,010
Standardfehler in Klammern		
*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1		

Erläuterungen: Die Koeffizienten zeigen Odds-Ratios. Werte grösser 1 bedeuten, dass die Variable einen positiven Einfluss aufweist, bei Werten unter 1 ist der Einfluss negativ.

In der Abbildung 48 weisen wir die Resultate der Analyse aus, inwieweit sich die Schadenswahrscheinlichkeit von Gebäuden mit Baujahr 2012 und später von den älteren Gebäuden unterscheiden. Die VKG hat 2010 das Hagelschutzregister lanciert, das seit 2012 Bestandteil der Norm SIA 261/1 «Einwirkungen auf Tragwerke – ergänzende Festlegungen» ist. Die Auswertungen zeigen für Gebäude ab Baujahr 2012 eine leicht tiefere Schadenswahrscheinlichkeit. So reduziert sich die Schadenswahrscheinlichkeit im Kanton Aargau um 2.2 %-Punkte bei Hagel 3 cm. Spezifische Objektschutzmassnahmen wirken bei derselben Hagelintensität stärker (Rückgang um 10 %-Punkte), jedoch wirken die verschärften Baunormen dafür flächendeckend bei allen neuen Gebäuden. Im Kanton Zürich ist der Rückgang der Schadenswahrscheinlichkeit bei Gebäuden ab 2012 deutlich kleiner als im Kanton Aargau.

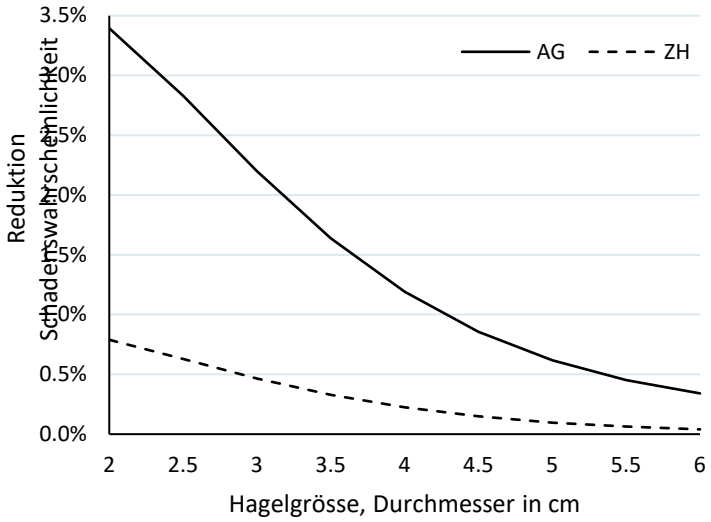


Abbildung 48 Rückgang der Schadenswahrscheinlichkeiten bei Gebäuden ab Baujahr 2012
Erläuterungen: Die Werte sind aus den geschätzten Koeffizienten der Logit-Regressionen berechnet.

In Tabelle 18 prüfen wir, inwieweit die Resultate robust sind, wenn wir für das Ereignis am 28. Juni 2021 im Kanton Zürich statt MESHS-Daten (Maximum Expected Hail Size) die Crowd-Daten, die MeteoSchweiz mit seiner App generiert, nutzen. Diese Daten wurden von MeteoSchweiz zur Verfügung gestellt und von Timo Schmid (Weather & Climate Risks Group) und Killian Brennan (Institute for Atmospheric and Climate Science), beide von der ETH Zürich, aufbereitet. Die Analysen zeigen, dass die Ergebnisse bei beiden Datenquellen vergleichbar und damit kohärent sind. Bei beiden Schätzresultaten haben Objekte mit Massnahmen eine signifikant tiefere Schadenswahrscheinlichkeit (Koeffizient ist kleiner als 1) und die Hagelgrösse hat einen positiven Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit (Koeffizient ist grösser als 1).

Tabelle 18: Regressionsresultate für Hagel für die Kantone Zürich: Vergleich Crowd- und Meshs-Daten

Abhängige Variable: Schaden	**Crowd**	**MESHS**
Massnahme	0.129***	0.132***
	(0.0644)	(0.0660)
Hagelgrösse	1.982***	1.537***
	(0.104)	(0.0741)
Konstante	0.001***	0.002***
	(0.0107)	(0.00214)
PLZ fixe Effekte	Ja	Ja
Objekttyp fixe Effekte	ja	Ja
Anzahl Gebäude	45,285	45,873
Standardfehler in Klammern		
*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1		

Erläuterungen: Die Koeffizienten zeigen Odds-Ratios. Werte grösser 1 bedeuten, dass die Variable einen positiven Einfluss aufweist, bei Werten unter 1 ist der Einfluss negativ.

Im Folgenden sind die Ergebnisse für Überschwemmungsschäden aufgrund von Niederschlag dargestellt. Ein Vergleich der Objekte mit Massnahmen in den drei Kantonen in Tabelle 20 illustriert die Schadensbetroffenheit von Gebäuden mit Massnahmen. In den drei Kantonen sind nur wenige Gebäude von einem Schaden betroffen, nachdem sie eine Massnahme implementiert haben (1, 11 bzw. 17 Objekte). Das deutet auf eine gewisse Wirksamkeit der Massnahmen hin.

Tabelle 19: Objekte mit Objektschutzmassnahmen gegen Überschwemmung und Schadensbetroffenheit

Anzahl Objekte mit Massnahmen	**Zürich**	**Luzern**	**Aargau**
Total	333	390	428
ohne Schaden	177	294	336
mit Schaden	156	96	92
mit Schaden nach Massnahmen	1	11	17
ohne Schaden nach Massnahmen	155	85	75

Erläuterung: Ausgewiesen sind die Anzahl Objekte, die eine von der Gebäudeversicherung finanziell unterstützte Massnahme implementiert haben. Es werden nur jene Schadensfälle berücksichtigt, die in den untersuchten Niederschlagsperioden angefallen sind. Diese Perioden decken die wesentlichen Niederschlagsereignisse zwischen 2005 und 2021 ab.

Die Darstellung in Tabelle 19 berücksichtigt jedoch nicht, dass die Niederschlagsintensitäten in den drei Kantonen unterschiedlich gewesen sein könnten. Dazu bedarf es wiederum einer systematischen Analyse mittels Logit-Regression, mit welcher den Einfluss der Niederschlagsintensität und anderer Eigenschaften der Gebäude (Orte, Gebäudemerkmale und Objekttypen) berücksichtigt wird.

In den folgenden Tabelle 20 sind die Resultate der Logit-Regression für Niederschlag (Zürich, Luzern und Aargau) wiedergegeben. Die abhängige Variable «Schaden» hat wiederum den Wert 0, wenn das Objekt keinen Überschwemmungsschaden aufweist, andernfalls den Wert 1. Die unabhängigen Variablen sind

– Massnahme (0: keine Massnahme; 1: Massnahme),
– Dauerstufe 1 bis 72 Stunden: Kategoriale Variable, die die Jährlichkeit für die entsprechende Dauer annimmt (0 bis 100).

Tabelle 20: Regressionsresultate für Niederschlag in den Kantonen Zürich, Luzern und Aargau

Abhängige Variable: Schaden	**ZH**	**LU**	**AG**
Massnahme = 1	0.136***	0.385*	0.195***
	(0.0842)	(0.219)	(0.0621)
Dauerstufe 1	2.604***	7.168***	1.735***
	(0.0876)	(0.412)	(0.0365)
Dauerstufe 6	0.904***	1.605***	1.191***
	(0.0136)	(0.0637)	(0.0149)
Dauerstufe 12	1.240***	1.229***	1.048***
	(0.0163)	(0.0258)	(0.0105)
Dauerstufe 24	1.101***	1.085***	1.053***
	(0.00714)	(0.00690)	(0.00348)
Dauerstufe 72	1.112***	0.988	0.992
	(0.0148)	(0.0169)	(0.00955)
Zeittrend	Ja	Ja	Ja
PLZ fixe Effekte	Ja	Ja	Ja
Gebäude fixe Effekte	Ja	Ja	Ja
Objekttyp fixe Effekte	Ja	Ja	Ja
Beobachtungen	318,859	436,217	120,459
Anzahl Objekte	2,728	3,685	2,233
Standardfehler in Klammern			
*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1			

Erläuterungen: Die Koeffizienten zeigen Odds-Ratios. Werte grösser 1 bedeuten, dass die Variable einen positiven Einfluss aufweist, bei Werten unter 1 ist der Einfluss negativ.

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt interpretieren: Objekte mit Massnahmen gegen Überschwemmungen weisen eine tiefere Schadenswahrscheinlichkeit auf (Koeffizient ist kleiner als 1). Die Koeffizienten bei den einzelnen Dauerstufen sind meist grösser als 1. Das bedeutet, dass eine höhere Jährlichkeit innerhalb dieser Stufen die Schadenswahrscheinlichkeit erhöht. Die Koeffizienten sind am grössten bei Dauerstufe 1, also dem Mass für Starkniederschlag. Das weist darauf hin, dass für diese Dauerstufe ein Anstieg der Jährlichkeit eine besonders grosse Zunahme der Schadenswahrscheinlichkeit auslöst. Der Koeffizient für Dauerstufe 6 für Zürich ist kleiner als 1. Das würde bedeuten, dass höhere Jährlichkeiten bei dieser Stufe mit tieferen Schadenswahrscheinlichkeiten einher gehen. Das ist ein Ergebnis, wofür wir bislang

keine Erklärung in den Daten gefunden haben. Bei der Interpretation im Bericht stützen wir uns nicht darauf ab. Die Koeffizienten bei der Dauerstufe 72 sind für Luzern und Aargau nicht signifikant, d.h. für diese Dauerstufe besteht in diesen beiden Kantonen kein Zusammenhang zwischen der Intensität der Niederschläge und der Schadenswahrscheinlichkeit.

8.2.4 Berechnung der Schadenswahrscheinlichkeiten für verschiedene Niederschlagsereignisse

Für die Kantone Luzern, Zürich und Aargau sind aus den geschätzten Koeffizienten die bedingten Schadenswahrscheinlichkeiten für unterschiedliche Niederschlagsereignisse differenziert zwischen Objekten mit und ohne Massnahmen berechnet. Für Luzern finden sich die Ergebnisse in der Tabelle 8, für Zürich in der folgenden Tabelle 21.

Tabelle 21: Massnahmen und Schadenswahrscheinlichkeiten durch Überschwemmung, Kanton Zürich

		Jährlichkeiten bei allen anderen Dauerstufen			
		Jährlichkeit < 2		**Jährlichkeit > 2**	
Dauerstufe		**Ohne Massnahme**	**Mit Massnahme**	**Ohne Massnahme**	**Mit Massnahme**
1 Stunde	< 2	0.042	0.006	0.073	0.012
	2 bis < 10	0.192	0.039	0.283	0.068
	>=10	0.986	0.915	0.992	0.950
6 Stunden *		Keine Werte ausgewiesen			
12 Stunden	< 2	0.042	0.006	0.220	0.047
	2 bis < 10	0.061	0.010	0.283	0.068
	10 bis < 30	0.224	0.048	0.559	0.241
	>= 30	0.820	0.585	0.963	0.833
24 Stunden	< 2	0.042	0.006	0.253	0.058
	2 bis < 10	0.050	0.008	0.283	0.068
	10 bis < 30	0.096	0.016	0.409	0.127
	>= 30	0.339	0.091	0.689	0.399
72 Stunden	0< 2	0.001	0.000	0.013	0.002
	2 bis < 10	0.002	0.000	0.016	0.002
	10 bis < 30	0.004	0.000	0.036	0.005
	>= 30	0.030	0.004	0.240	0.041

Erläuterungen: Die Werte sind aus den geschätzten Koeffizienten der Logit-Regressionen berechnet. Die Werte für die Dauerstufe 6 (*) basieren auf einem geschätzten Koeffizienten, der der üblichen Hypothese, dass grössere Niederschläge häufiger Schäden bewirken, widerspricht. Deshalb werden für diese Stufe keine Werte ausgewiesen.

Tabelle 22: Massnahmen und Schadenswahrscheinlichkeiten durch Überschwemmung, Kanton Aargau

		Jährlichkeiten bei allen anderen Dauerstufen			
		Jährlichkeit < 2		Jährlichkeit >= 2	
Dauerstufe	**Jährlichkeit in Jahren**	**Ohne Massnahme**	**Mit Massnahme**	**Ohne Massnahme**	**Mit Massnahme**
1 Stunde	< 2	0.070	0.015	0.109	0.025
	2 bis < 10	0.176	0.043	0.254	0.069
	>=10	0.918	0.714	0.948	0.797
6 Stunden	< 2	0.070	0.015	0.198	0.050
	2 bis < 10	0.095	0.021	0.254	0.069
	10 bis < 30	0.278	0.078	0.539	0.215
	>=30	0.897	0.665	0.967	0.860
12 Stunden	< 2	0.070	0.015	0.238	0.063
	2 bis < 10	0.076	0.016	0.254	0.069
	10 bis < 30	0.106	0.024	0.323	0.096
	>= 30	0.222	0.058	0.522	0.203
24 Stunden	< 2	0.070	0.015	0.236	0.063
	2 bis < 10	0.077	0.017	0.254	0.069
	10 bis < 30	0.110	0.025	0.330	0.099
	>= 30	0.244	0.065	0.550	0.223
72 Stunden	0< 2	0.070	0.015	0.261	0.071
	2 bis < 10	0.068	0.014	0.254	0.069
	10 bis < 30	0.058	0.012	0.227	0.059
	>= 30	0.040	0.008	0.168	0.041

Erläuterungen: Die Werte zeigen die bedingten Schadenswahrscheinlichkeiten für unterschiedliche Niederschlagsereignisse. Die Werte sind aus den geschätzten Koeffizienten der Logit-Regressionen berechnet.

9 Literaturverzeichnis

Amt für Wald und Naturgefahren des Kantos Graubünden (2023): Lokales Naturgefahrenmanagement. LNB, GFS, Notfallplanungen – wie können wir uns vorbereiten? Online verfügbar unter https://www.gr.ch/DE/institutionen/verwaltung/diem/awn/naturgefahren/naturgefahren-management/Seiten/3_1_7_lok_nat_manag.aspx, zuletzt geprüft am 31.03.2023.

BAFU (2022a): Die 5 Gefahrenstufen für Hochwasser. Hg. v. Bundesamt für Umwelt (BAFU). Online verfügbar unter https://www.hydrodaten.admin.ch/de/die-5-gefahrenstufen-fur-hochwasser.html, zuletzt geprüft am 15.07.2022.

BAFU (2022b): Wasser: Messwerte und Statistik. Hg. v. Bundesamt für Umwelt (BAFU). Online verfügbar unter https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/zustand/daten.html, zuletzt aktualisiert am 13.09.2022.

Barras, Hélène; Hering, Alessandro; Martynov, Andrey; Noti, Pascal-Andreas; Germann, Urs; Martius, Olivia (2019): Experiences with >50,000 Crowdsourced Hail Reports in Switzerland. In: *Bulletin of the American Meteorological Society* 100 (8), S. 1429–1440. DOI: 10.1175/BAMS-D-18-0090.1.

Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (2018): Integrale Konzepte zum kommunalen Sturzflut Risikomanagement. (Infoblatt zum Sonderprogramm nach Nr. 2.4 RZWas). Online verfügbar unter https://www.stmuv.bayern.de/themen/wasserwirtschaft/foerderung/doc/infoblatt_sonderprogramm_sturzfluten.pdf, zuletzt geprüft am 24.03.2023.

Bernet, Daniel B.; Prasuhn, Volker; Weingartner, Rolf (2017): Surface water floods in Switzerland: what insurance claim records tell us about the damage in space and time. In: *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 17 (9), S. 1659–1682. DOI: 10.5194/nhess-17-1659-2017.

Betschart, M.; Hering, A. (2012): Automatic Hail Detection at MeteoSwiss. Verification of the radar-based hail detection algorithms POH, MESHS and HAIL. In: *Arbeitsbericht MeteoSchweiz* (238).

Bezzola, Gian Reto; Hegg, Christoph (Hg.) (2007): Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Bundesamt für Umwelt BAFU, eidgenössische Forschungsanstalt WSL (Umwelt-Wissen, Nr. 0707). Online verfügbar unter https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/naturgefahren/uw-umwelt-wissen/ereignisanalyse_hochwasser2005teil1prozesseschaedenundersteeinor.pdf.download.pdf/ereignisanalyse_hochwasser2005teil1prozesseschaedenundersteeinor.pdf, zuletzt geprüft am 16.01.2023.

BMI/BMF (2022): Bericht zur Hochwasserkatastrophe 2021: Katastrophenhilfe, Wiederaufbau und Evaluierungsprozesse. 31.03.2023. Online verfügbar unter https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/veroeffentlichungen/2022/abschlussbericht-hochwasserkatastrophe.pdf;jsessionid=763FAF7C0E043ADE4ED0236FE2CDFFB5.1_cid287?__blob=publicationFile&v=3.

BMLFUW (2022): WebGIS-Applikation eHYD. Online verfügbar unter https://ehyd.gv.at/, zuletzt aktualisiert am 13.09.2022.

Bubeck, P.; Botzen, W. J. W.; Kreibich, H.; Aerts, J. C. J. H. (2012): Long-term development and effectiveness of private flood mitigation measures: an analysis for the German part of the river Rhine. In: *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 12 (11), S. 3507–3518. DOI: 10.5194/nhess-12-3507-2012.

CEDIM (2021): Hochwasser Mitteleuropa, Juli 2021 (Deutschland) . 21. Juli 2021 - Bericht Nr. 1 „Nordrhein-Westfalen & Rheinland-Pfalz". Unter Mitarbeit von A. Schäfer, B. Mühr, J. Daniell, U. Ehret, F. Ehmele, K. Küpfer et al. Hg. v. CEDIM & KIT. Online verfügbar unter https://www.dkkv.org/fileadmin/user_upload/FDA_HochwasserJuli2021_Bericht1.pdf, zuletzt geprüft am 13.09.2022.

Cloke, Hannah (2021): Europe's catastrophic flooding was foreecast well in advance - what went so wrong? Hg. v. The Conversation. Online verfügbar unter https://theconversation.com/europes-catastrophic-flooding-was-forecast-well-in-advance-what-went-so-wrong-164818, zuletzt geprüft am 02.06.2023.

Croissant, Yves; Millo, Giovanni (2019): Panel data econometrics with R. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons. Online verfügbar unter https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781119504641.

Cuprakowa, Julia (2022): Schäden durch Unwetter: Baden-Württemberg liegt bei Bilanz weit vorn. In: *echo24*, 20.05.2022. Online verfügbar unter https://www.echo24.de/baden-wuerttemberg/unwetter-schaeden-baden-wuerttemberg-bilanz-versicherung-jahr-2021-menschen-zr-91556789.html, zuletzt geprüft am 31.03.2023.

DKKV (2022): Die Flutkatastrophe im Juli 2021 Deutschland. Ein Jahr danach: Aufarbeitung und erste Lehren für die Zukunft. Online verfügbar unter https://dkkv.org/wp-content/uploads/2022/11/DKKV_Schriftenreihe_62_2.Auflage.pdf, zuletzt geprüft am 31.03.2023.

DWD (2014): Klimawandel verändert Häufigkeit einzelner Wetterlagen über Westeuropa. Hg. v. Deutscher Wetterdienst. Online verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel/_functions/aktuellemeldungen/140808_klimawandel_wetterlagen.html, zuletzt aktualisiert am 13.09.2022.

DWD (2022a): KOSTRA, precipitation. Online verfügbar unter https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/return_periods/precipitation/KOSTRA/KOSTRA_DWD_2010R/, zuletzt geprüft am 13.09.2022.

DWD (2022b): RADOLAN, historical, grids_germany, hourly. Online verfügbar unter https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/hourly/radolan/historical/bin/, zuletzt geprüft am 13.09.2022.

Europäische Union (2007): über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken. Richtilinie 2007/60/EC des Europäischen Parlaments und des Rates (Amtsblatt der Europäischen Union, L 288).

Faranda, Davide; Bourdin, Stella; Ginesta, Mireia; Krouma, Meriem; Messori, Gabriele; Noyelle, Robin et al. (2022): A climate-change attribution retrospective of some impactful weather extremes of 2021.

Francke, Victor (2022): Behörde listet Flutschäden auf. Bilanz des Schreckens an der Ahr. In: *Generalanzeiger Bonn*, 03.01.2022. Online verfügbar unter https://ga.de/region/ahr-und-rhein/flutschaeden-bilanz-des-schreckens-an-der-ahr_aid-64945969, zuletzt geprüft am 31.03.2023.

Gavari-Starkie, Elisa; Casado-Claro, María-Francisca; Navarro-González, Inmaculada (2021): The Japanese Educational System as an International Model for Urban Resilience. In: *International journal of environmental research and public health* 18 (11). DOI: 10.3390/ijerph18115794.

GDV (Hg.) (2021): Naturgefahrenreport 2021. Die Schaden-Chronik der deutschen Versicherer.

GDV (2022): Nachfrage sinkt wieder auf Niveau vor Ahr-Flut. Online verfügbar unter https://www.gdv.de/gdv/medien/medieninformationen/nachfrage-sinkt-wieder-auf-niveau-vor-ahr-flut-84922, zuletzt geprüft am 21.03.2023.

Genovese, Elisabetta; Thaler, Thomas (2020): The benefits of flood mitigation strategies: effectiveness of integrated protection measures. In: *AIMSGEO* 6 (4), S. 459–472. DOI: 10.3934/geosci.2020025.

Graf, Vinzenz (2021): Hagel 28. Juli 2021 - Kanton Luzern stark betroffen, 2021, zuletzt geprüft am 03.02.2023.

Hall, Julia; Arheimer, B.; Borga, M.; Claps, P.; Kiss, Andrea; Kjeldsen, T. R. et al. (2014): Understanding flood regime changes in Europe: a state-of-the-art assessment. In: *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 18 (7), S. 2735–2772. DOI: 10.5194/hess-18-2735-2014.

IGS-Austria (2011): Studie Naturkatastrophenprävention. Empfehlungen zur Vermeidung von Schäden, hervorgerufen durch Naturkatastrophen, anhand von 300 besichtigten Objekten durch IGS und 1.150 analysierten Schadensakten durch die OÖV. Online verfügbar unter https://elementarschaden.at/wp-content/uploads/2015/12/Studie_NATKAT-IGS.pdf, zuletzt geprüft am 21.09.2022.

Imhof, Markus (2022): Analyse langfristiger Gebäudeschadendaten. Auswertung des Datenbestandes der Schadenstatistik VKG.

Ingenieurbüro Kokai GmbH (2018): Integrales Hochwasserschutz- und Rückhaltekonzept Darchinger Dorfbach Gewässer III. Ordnung. Gemeinde Valley.

IPCC (Hg.) (2001): Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group 1 to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press.

IPCC (Hg.) (2021a): Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Unter Mitarbeit von V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger et al.: Cambridge University Press. Online verfügbar unter https://report.ipcc.ch/ar6/wg1/IPCC_AR6_WGI_FullReport.pdf.

IPCC (2021b): Zusammenfassung für die politische Entscheidungsfindung. In: Naturwissenschaftliche Grundlagen. Beitrag von Arbeitsgruppe I zum Sechsten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen. Hg. v. Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle.

Junghänel, T.; Bissolli, P.; Daßler, J.; Fleckenstein, R.; Imbery, F.; Janssen, W. et al. (2021): Hydro-klimatologische Einordnung der Stark- und Dauerniederschläge in Teilen Deutschlands im Zusammenhang mit dem Tiefdruckgebiet „Bernd" vom 12. bis 19. Juli 2021. Hg. v. Deutscher Wetterdienst.

Kahraman, Abdullah; Kendon, Elizabeth J.; Chan, Steven C.; Fowler, Hayley J. (2021): Quasi-Stationary Intense Rainstorms Spread Across Europe Under Climate Change. In: *Geophys. Res. Lett.* 48 (13). DOI: 10.1029/2020GL092361.

Kautz, Lisa-Ann; Martius, Olivia; Pfahl, Stephan; Pinto, Joaquim G.; Ramos, Alexandre M.; Sousa, Pedro M.; Woollings, Tim (2022): Atmospheric blocking and weather extremes over the Euro-Atlantic sector – a review. In: *Weather Clim. Dynam.* 3 (1), S. 305–336. DOI: 10.5194/wcd-3-305-2022.

Köplin, N.; Schädler, B.; Viviroli, D.; Weingartner, Rolf (2014): Seasonality and magnitude of floods in Switzerland under future climate change. In: *Hydrol. Process.* 28 (4), S. 2567–2578. DOI: 10.1002/hyp.9757.

Kopp, Jérôme; Schröer, Katharina; Schwierz, Cornelia; Hering, Alessandro; Germann, Urs; Martius, Olivia (2022): The summer 2021 Switzerland hailstorms: weather situation, major impacts and unique observational data. In: *Weather*, Artikel wea.4306. DOI: 10.1002/wea.4306.

Kreibich, H.; Christenberger, S.; Schwarze, R. (2011): Economic motivation of households to undertake private precautionary measures against floods. In: *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 11 (2), S. 309–321. DOI: 10.5194/nhess-11-309-2011.

Kreibich, Heidi; van Loon, Anne F.; Schröter, Kai; Ward, Philip J.; Mazzoleni, Maurizio; Sairam, Nivedita et al. (2022): The challenge of unprecedented floods and droughts in risk management. In: *Nature* 608 (7921), S. 80–86. DOI: 10.1038/s41586-022-04917-5.

Kreienkamp, Frank; Philip, Sjoukje Y.; Tradowsky, Jordis S.; Kew, Sarah F.; Lorenz, Philip; Arrighi, Julie et al. (2021): Rapid attribution of heavy rainfall events leading to the severe flooding in Western Europe during July 2021. In: *World Weather Attribution*.

Kron, W.; Bell, R.; Thiebes, B.; Thieken, A. H. (2022): The July 2021 flood disaster in Germany. 2022 HELP Global Report on Water and Disasters. High-level Experts and Leaders Panel on Water and Disasters (HELP). Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/365375445_The_July_2021_flood_disaster_in_Germany, zuletzt geprüft am 31.03.2023.

Landesrechnungshof (2013): Naturgefahren- und Naturkatastrophenmanagement im Land Tirol. Online verfügbar unter https://www.tirol.gv.at/fileadmin/landtag/landesrechnungshof/downloads/berichte/2014/Naturgefahren-_und_Naturkatastrophenmanagement_im_Land_Tirol.pdf, zuletzt geprüft am 31.03.2023.

Landesregierung Rheinland-Pfalz (2022a): Ein Jahr Wiederaufbau in Rheinland-Pfalz. Online verfügbar unter wieder-aufbau.rlp.de/de/wiederaufbau2022, zuletzt geprüft am 31.03.2023.

Landesregierung Rheinland-Pfalz (2022b): Trinkwasser wieder angeschlossen und Abwasserentsorgung im Aufbau. Online verfügbar unter https://wiederaufbau.rlp.de/de/themen/wasser/, zuletzt geprüft am 31.03.2023.

Lenderink, Geert; van Meijgaard, Erik (2010): Linking increases in hourly precipitation extremes to atmospheric temperature and moisture changes. In: *Environ. Res. Lett.* 5 (2), S. 25208. DOI: 10.1088/1748-9326/5/2/025208.

Liniger, M.; St. Tobler; Stalder, R.; Auchli, J. (2007): Menznau, LU: Gefahrenkarte. Technischer Bericht, zuletzt geprüft am 30.01.2023.

Locher, Peter; Willi, Christina; Quinto, Cornel; Röthlisberger, Veronika; Kaltenrieder, Rahel; Keiler, Margreth; Zulauf, Christoph (2017): Wirkung und Nutzen von Massnahmen zur Elementarschadenprävention an Gebäuden. Schlussbericht zu den Arbeiten im Rahmen der 9. Ausschreibung der Präventionsstiftung der Kantonalen Gebäudeversicherungen. Kurzbericht, zuletzt geprüft am 14.12.2022.

Ludwig, Patrick; Ehmele, Florian; Franca, Mário J.; Mohr, Susanna; Caldas-Alvarez, Alberto; Daniell, James E. et al. (2022): A multi-disciplinary analysis of the exceptional flood event of July 2021 in central Europe. Part 2: Historical context and relation to climate change.

mdr WISSEN (2022): Wissenschaftler fordern Warnkarte für Starkregen und Sturzfluten, 31.05.2022. Online verfügbar unter https://www.mdr.de/wissen/umwelt/unwetter-warnkarte-starkregen-sturzfluten-100.html, zuletzt geprüft am 31.03.2023.

Merk, Christine; Höger, Andreas (2021): Starkregen werden häufiger und gefährlicher: Was können Gemeinden tun? In: *Merkur*, 29.07.2021. Online verfügbar unter https://www.merkur.de/lokales/region-holzkirchen/valley-ort77216/hochwasser-was-koennen-gemeinden-tun-90889061.html, zuletzt geprüft am 23.03.2023.

Merkur (2021): Hochwasser in Bayern: Zerstörung und Millionenschäden im Berchtesgadener Land, 09.08.2021. Online verfügbar unter https://www.merkur.de/bayern/hochwasser-bayern-zerstoerung-millionenschaeden-berchtesgadener-land-90911263.html, zuletzt geprüft am 31.03.2023.

Merz, Bruno; Vorogushyn, Sergiy; Uhlemann, Steffi; Delgado, J.; Hundecha, Yeshewatesfa (2012): *HESS Opinions* "More efforts and scientific rigour are needed to attribute trends in flood time series". In: *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16 (5), S. 1379–1387. DOI: 10.5194/hess-16-1379-2012.

MeteoSchweiz (o. J.): Hourly Precipitation Estimation through Rain-Gauge and Radar: CombiPrecip. Hg. v. Federal Office of Meteorology and Climatology MeteoSwiss. Online verfügbar unter https://www.meteoschweiz.admin.ch/content/dam/meteoswiss/en/climate/swiss-climate-in-detail/doc/ProdDoc_CPC.pdf, zuletzt aktualisiert am 13.09.2022.

MeteoSchweiz (2021a): Hagelklima Schweiz. Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie. Online verfügbar unter https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/forschung-und-zusammenarbeit/projekte.subpage.html/de/data/projects/2018/hagelklima-schweiz.html.

MeteoSchweiz (2021b): Hagelklima Schweiz. Daten und Methoden. Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie. Online verfügbar unter https://www.meteoschweiz.admin.ch/klima/klima-der-schweiz/hagelklimatologie/daten-und-methoden.html.

MeteoSchweiz (2022): Extremwertanalysen (Version 2020). Online verfügbar unter https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/schweizer-klima-im-detail/extremwertanalysen/laengste-zeitperiode.html, zuletzt geprüft am 13.09.2022.

Meteotest (2020): Nationales Hagelprojekt. Schlussbericht: Aufbereitung historischer Hagel-Daten. Unter Mitarbeit von Stefan Müller und Michael Schmutz (Version, 2).

Mohr, Susanna; Ehret, Uwe; Kunz, Michael; Ludwig, Patrick; Caldas-Alvarez, Alberto; Daniell, James E. et al. (2023): A multi-disciplinary analysis of the exceptional flood event of July 2021 in central Europe – Part 1: Event description and analysis. In: *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 23 (2), S. 525–551. DOI: 10.5194/nhess-23-525-2023.

Munich Re (2022): Naturkatastrophen machen 2021 besonders teuer. In: *Versicherungswirtschaft heute*, 11.01.2022.

Nisi, L.; Martius, O.; Hering, A.; Kunz, M.; Germann, U. (2016): Spatial and temporal distribution of hailstorms in the Alpine region: a long-term, high resolution, radar-based analysis. In: *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 142 (697), S. 1590–1604. DOI: 10.1002/qj.2771.

Nisi, Luca; Hering, Alessandro; Germann, Urs; Martius, Olivia (2018): A 15-year hail streak climatology for the Alpine region. In: *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 144 (714), S. 1429–1449. DOI: 10.1002/qj.3286.

NÖS/dpa (2021): Evakuierungen, Sorgen, Hilfsbereitschaft. In: *ÄrzteZeitung*, 15.07.2021. Online verfügbar unter https://www.aerztezeitung.de/Panorama/Evakuierungen-Sorgen-Hilfsbereitschaft-421321.html, zuletzt geprüft am 31.03.2023.

Osberghaus, Daniel; Philippi, Alina (2016): Private Hochwasservorsorge und Elementarschadenversicherung. In: *ZVersWiss* 105 (3), S. 289–306. DOI: 10.1007/s12297-016-0341-2.

Passauer Neue Presse (2021): Versicherer: Hagelschaden in Burghausen in Millionenhöhe, 25.06.2021. Online verfügbar unter https://www.pnp.de/lokales/landkreis-altoetting/burghausen/Der-Hagelschaden-geht-wohl-in-die-Millionen-4024587.html, zuletzt geprüft am 31.03.2023.

Patt, H.; Jüpner, R. (Hg.) (2013): Hochwasser-Handbuch. Auswirkungen und Schutz. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer.

Philip, Sjoukje; Kew, Sarah; van Oldenborgh, Geert Jan; Otto, Friederike; Vautard, Robert; van der Wiel, Karin et al. (2020): A protocol for probabilistic extreme event attribution analyses. In: *Adv. Stat. Clim. Meteorol. Oceanogr.* 6 (2), S. 177–203. DOI: 10.5194/ASCMO-6-177-2020.

Raschky, Paul; Schwarze, Reimund; Schwindt, Manijeh; Weck-Hannemann, Hannelore (2009): Alternative Finanzierungs und Versicherungslösungen. Vergleich unterschiedlicher Risikotransfersysteme dreier vom Augusthochwasser 2005 betroffener Länder: Deutschland, Österreich und Schweiz, zuletzt geprüft am 17.03.2023.

RND/dpa (2021): Nach Hochwasser. Tausende Menschen im Westen immer noch ohne Strom, 27.07.2021. Online verfügbar unter https://www.rnd.de/panorama/nach-hochwasser-tausende-menschen-im-westen-immer-noch-ohne-strom-HNHVBUF35EZDXRC43Y2NB7JQXQ.html, zuletzt geprüft am 31.03.2023.

Rodenkirch, Dirk (2022): Hydrologe: Flut-Videos und -Fotos zeigen hohe Fliessgeschwindigkeit. In: *SWR Aktuell*, 07.10.2022. Online verfügbar unter https://www.swr.de/swraktuell/rheinland-pfalz/flut-ausschuss-hydrologisches-gutachten-zu-spaete-warnung-100.html, zuletzt geprüft am 31.03.2023.

Roggenkamp, Thomas; Herget, Jürgen (2014): Reconstructing peak discharges of historic floods of the river Ahr, Germany. In: *Erdkunde* 68 (1), S. 49–59. DOI: 10.3112/erdkunde.2014.01.05.

Röthlisberger, Veronika; Keiler, Margreth; Kaltenrieder, Rahel; Quinto, Cornel; Locher, Peter; Willi, Christina; Willi, Christian (2017): Wirkung und Nutzen von Massnahmen zur Elementarschadenprävention an Gebäuden. Schlussbericht zu den Arbeiten im Rahmen der 9. Ausschreibung der Präventionsstiftung der Kantonalen Gebäudeversicherungen. Gesamtbericht mit Anhängen.

Salzburger Landeskorrespondenz (05.08.2021): Juli-Hochwasser richtete in Salzburg 30,6 Millionen Euro Schaden an. Wohnhäuser, Firmen, Landwirtschaftsbetriebe und ländliche Infrastruktur betroffen. Online verfügbar unter https://service.salzburg.gv.at/lkorrj/detail?nachrid=65448, zuletzt geprüft am 31.03.2023.

Schneeberger, Klaus; Rössler, Ole; Weingartner, Rolf (2018): Spatial patterns of frequent floods in Switzerland. In: *Hydrological Sciences Journal* 63 (6), S. 895–908. DOI: 10.1080/02626667.2018.1450505.

Schroeer, Katharina; Trefalt, Simona; Schwierz, Cornelia; Hering, Alessandro; Germann, Urs (2021): CHHC: Swiss Hail Climatology. Unter Mitarbeit von Federal Office of Meteorology and Climatology MeteoSwiss.

Schwäbische Zeitung (2021): Nach Hagelschlag: Obstbauern und Winzer hoffen auf sonnige Tage., 17.08.2021. Online verfügbar unter https://www.schwaebische.de/landkreis/landkreis-lindau/nonnenhorn_artikel,-nach-hagelschlag-obstbauern-und-winzer-hoffen-auf-sonnige-tage-_arid,11400250.html, zuletzt geprüft am 31.03.2023.

Stadt Kufstein (2021): Gemeinderatssitzungen. Online verfügbar unter https://www.kufstein.gv.at/Stadtpolitik/Video-Mitschnitte_Gemeinderat, zuletzt geprüft am 31.03.2023.

Stangl, Martha et. al (2022): Klimastatusbericht Österreich 2021. Graz.

Starl, Hans (2023): Gebäudeschäden in Österreich als Folge von Hagelschlag und pluvialen Überflutungen. Präventive Gebäudeschutzmaßnahmen unter Berücksichtigung von klimawandelbedingten Veränderungen. Dissertation eingereicht an der Technischen Universität Graz, zuletzt geprüft am 17.03.2023.

Steingass, N. (2022): Zehn Fragen und Antworten aus dem Bürgerdialog. Newsletter zum Wiederaufbau. Online verfügbar unter https://wiederaufbau.rlp.de/de/startseite/, zuletzt geprüft am 31.03.2023.

Südkurier (2021): Dreistündiges Unwetter am Mittwochnachmittag über Eggingen richtet grössere Schäden an, 20.05.2021. Online verfügbar unter https://www.suedkurier.de/region/hochrhein/wutoeschingen/dreistuendiges-unwetter-am-mittwochnachmittag-ueber-eggingen-richtet-groessere-schaeden-an;art372593,10813485, zuletzt geprüft am 31.03.2023.

Szönyi, M.; Roezer, V.; Deubelli, T.; Ulrich, J.; MacClune, K.; Laurien, F.; Norton, R. (2022): PERC | Ereignisanalyse Hochwasser „Bernd". Online verfügbar unter https://www.newsroom.zurich.de/documents/perc-ereignisanalyse-bernd-423713, zuletzt geprüft am 31.03.2023.

Toller, Andreas (2017): Wo Verbraucher schlechter versichert sind als sie denken. In: *WirtschaftsWoche*, 31.05.2017. Online verfügbar unter https://www.wiwo.de/finanzen/vorsorge/schutz-gegen-risiken-wo-verbraucher-schlechter-versichert-sind-als-sie-denken/19870006.html, zuletzt geprüft am 31.03.2023.

Uni Hamburg (Hg.) (2022): MODES - Modal view of atmospheric circulation. Online verfügbar unter https://modes.cen.uni-hamburg.de/products#HM, zuletzt aktualisiert am 13.09.2022.

van Oldenborgh, Geert Jan; van der Wiel, Karin; Kew, Sarah; Philip, Sjoukje; Otto, Friederike; Vautard, Robert et al. (2021): Pathways and pitfalls in extreme event attribution. In: *Climatic Change* 166 (1-2). DOI: 10.1007/S10584-021-03071-7.

Voss, M. et. al (2021): Die Evakuierung des St.-Antonius-Hospitals Eschweiler während der Flutereignisse im Juli 2021. Hg. v. Katastrophenforschungsstelle Berlin. Berlin (KFS Working Paper, Nr. 25). Online verfügbar unter http://www.polsoz.fu-berlin.de/kfs, zuletzt geprüft am 31.03.2023.

Weidinger, Anna-Lena (2022): Was ist in der Flutnacht passiert? Ein Protokoll. In: *SWR Aktuell*, 12.10.2022. Online verfügbar unter https://www.swr.de/swraktuell/rheinland-pfalz/flut-rekonstruktion-ahrtal-protokoll-100.html, zuletzt geprüft am 31.03.2023.

Weingartner, Rolf (2018): Veränderungen der Abflussregimes der Schweiz in den letzten 150 Jahren. Eine Studie im Rahmen des NCCS Themenschwerpunktes "Hydrologische Grundlagen" des Nationalen Centre for Climate Services. Hg. v. Bundesamt für Umwelt (BAFU). Bern.

ZAMG (2022): INCA L - stündliche Daten, zuletzt aktualisiert am https://data.hub.zamg.ac.at/dataset/inca_l-stuendlich, zuletzt geprüft am 15.07.2022.