



Bundesamt
für Bevölkerungsschutz
und Katastrophenhilfe

Klassifikation meteorologischer Extremereignisse zur Risikovorsorge gegenüber Starkregen für den Bevölkerungsschutz und die Stadtentwicklung (KlamEx)

Projekt der Strategischen Behördenallianz „Anpassung an den Klimawandel“



Fachinformation



Abschlussbericht

August 2021



**Abschluss-
bericht
August 2021**

KlamEx – Abschlussbericht

Klassifikation meteorologischer Extremereignisse zur Risikovorsorge gegenüber Starkregen für den Bevölkerungsschutz und die Stadtentwicklung (KlamEx)

Projekt der Strategischen Behördenallianz „Anpassung an den Klimawandel“



Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe

Laufzeit: 01.01.2019 – 31.12.2020

Projektleitung:

Christina Nikogosian (Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe)

Dr. Tanja Winterrath (Deutscher Wetterdienst)

Bearbeitung und Berichterstellung:

Christina Nikogosian, Isabelle Fischer (Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe)

Dr. Tanja Winterrath, Ewelina Walawander (Deutscher Wetterdienst)

mit Beiträgen von Daniel Schmitz-Kröll (Freiwillige Feuerwehr Stolberg/Rheinland) und Valerie Wischott (Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen)

Ansprechpartnerinnen und -partner der Strategischen Behördenallianz:

Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK): Dr. Monika John-Koch

Bundesanstalt Technisches Hilfswerk (THW): Tobias Nothhelfer

Bundesinstitut für Bau- Stadt- und Raumforschung (BBSR): Dr. Fabian Dosch

Deutscher Wetterdienst (DWD): Dr. Andreas Becker

Umweltbundesamt (UBA): PD Dr. Achim Daschkeit

Nikogosian, C., Winterrath, T., Walawander, E., Fischer, I., Schmitz-Kröll, D., Wischott, V. (2021):

Klassifikation meteorologischer Extremereignisse zur Risikovorsorge gegenüber Starkregen für den Bevölkerungsschutz und die Stadtentwicklung. Projekt der Strategischen Behördenallianz „Anpassung an den Klimawandel“. Abschlussbericht.

Vorwort



von Dr. Wolfram Geier,
Abteilungsleiter, Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe

Liebe Leserinnen und Leser,

Starkregen! Ausnahmezustand und Katastrophenalarm in zahlreichen Kreisen und Städten in Deutschland im Sommer 2021! Die Bilder von sintflutartigem Regen, überfluteten Siedlungen, beschädigten und völlig zerstörten Gebäuden, von Menschen, die versuchen, dem Wasser Herr zu werden, stehen uns vor dem Hintergrund der jüngsten Ereignisse mehr denn je lebhaft vor Augen. Die zahlreichen Todesfälle, die vielen Verletzten und die Bilder extremer Zerstörung ganzer Landstriche machen fassungslos und berühren zutiefst. An die Ereignisse unmittelbar gekoppelte Ausfälle elementarer Versorgungsinfrastrukturen wie Strom, Trinkwasser, Telekommunikation sowie von Verkehrswegen, von Arztpraxen, Apotheken und Lebensmittelgeschäften stellen die Bevölkerung in den am stärksten betroffenen Gebieten auch noch über Wochen und Monate nach dem Ereignis vor nicht gekannte Herausforderungen.

Die aktuellen Ereignisse zeigen uns deutlich, dass wir noch immer nicht genug über die Gefährdung, die von Starkregen ausgeht, sowie den richtigen Umgang damit wissen. Was bedeutet dies nicht zuletzt auch für diejenigen, die noch während des Ereignisses Menschen und Sachwerte retten und im Anschluss daran über viele Stunden, Tage, Wochen und Monate Schäden beseitigen? Die Organisationen im Bevölkerungsschutz – darunter vor allem die Feuerwehren und das THW, aber auch die Sanitäts- und Betreuungsdienste – sind bei Starkregen besonders gefordert. „Einsatz bis ans Ende der Kräfte?“ überschreibt nicht ohne Grund das

Umweltbundesamt ein Kapitel im aktuellen Monitoringbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Dem subjektiven Eindruck vieler Einsatzkräfte nach dürfte diese Frage zu bejahen sein – und mehr noch: Sie bringt unweigerlich die Anschlussfrage mit sich, wie eine steigende Anzahl von mitunter noch intensiveren Starkregenereignissen unter dem Einfluss des Klimawandels in Zukunft noch zu bewältigen sein wird.

Vor dem Hintergrund der Zunahme von Extremwetterlagen beschloss die Strategische Behördenallianz „Anpassung an den Klimawandel“, sich im Projekt „KlamEx“ dem Thema Starkregen noch weiter anzunähern und dabei insbesondere auch die Auswirkungen dieser Ereignisse auf die Einsatzbelastung der Organisationen in den Blick zu nehmen. Die Grundlage dafür bildeten die Ergebnisse des Vorgängerprojekts „Radarklimatologie“ (2014-2017). Die nahezu lückenlose Erfassung aller Starkregenereignisse innerhalb Deutschlands seit 2001 ermöglichte es nun, diese Ereignisse hinsichtlich ihres Zusammenhangs zum Einsatzgeschehen der Feuerwehren und des THW zu untersuchen. Erstmals wurde in Vorbereitung dieser Analysen über eine breite Befragung von Kommunen auch ein Überblick über die angewendeten Verfahren zur Dokumentation unwetterbedingter Einsätze gewonnen – denn der Aufbau der Einsatzdatensätze entscheidet darüber, inwieweit sich diese Daten mit Klimadaten verknüpfen lassen und ob zwischen verschiedenen Kommunen dahingehend eine Vergleichbarkeit gegeben ist.

Die Ergebnisse des Projekts können uns hoffnungsvoll und zugleich nachdenklich stimmen. Nach-

denklich, da die analysierten Messdaten aufzeigen, dass höhere Umgebungstemperaturen das Auftreten intensiverer Starkregenereignisse begünstigen. Und nachdenklich auch deshalb, da einzelne Ereignisse eine erhebliche Anzahl von Einsätzen nach sich ziehen können – was auf ein hohes Maß aufgetretener Schäden schließen lässt. Deutlich wurde allerdings auch: Nicht jedes Ereignis bringt die Feuerwehren an ihre Belastungsgrenzen. Ob dies geschieht, hängt maßgeblich von den örtlichen Bedingungen ab: Hohe Flächenversiegelung, dichte Besiedlung und das Vorliegen von Senken begünstigen viele Einsätze. Im Umkehrschluss heißt das, dass wir Starkregen nicht schutzlos ausgeliefert sein müssen, wenn entsprechende stadtplanerische Maßnahmen mit einer intelligenten Siedlungswasserwirtschaft sowie einem auf Wetterextreme noch besser vorbereiteten Bevölkerungsschutz kombiniert werden. Aber auch die Bürgerinnen und Bürger können und müssen ihren Teil zur Vermeidung von Schäden beitragen, indem sie Informationsangebote wahrnehmen, sich selbst und ihre Eigenheime durch Eigenvorsorge besser schützen und sich im Ereignisfall selbst zu helfen wissen. Vor allem aber für die Organisationen im Bevölkerungsschutz bietet der vorliegende Bericht auch eine Vielzahl an Handlungsoptionen an, die dazu beitragen können, die Vorbereitung auf diese Ereignisse zu stärken. Damit die Anpassung in den verschiedenen Bereichen gelingt, ist es von entscheidender Bedeutung, dass die verantwortlichen Akteure ungeachtet ihrer Ebenenzugehörigkeit zusammenrücken – operative Kräfte, Bürgerinnen und Bürger, Kommunen, Länder, der Bund: Sie alle sind gefragt, der Starkregengefährdung mittels ihrer jeweiligen Erfahrungen und Kompetenzen ganzheit-

lich zu begegnen. Dass diese und andere Formen der Netzwerkbildung sowie die daraus erwachsenden integrativen Anpassungsleistungen die negativen Folgen eines Starkregenereignisses wirksam abfedern können, haben nicht zuletzt die geschilderten Erfahrungen zu den in „KlamEx“ betrachteten Fallbeispielen eindrücklich vor Augen geführt.

Ich danke allen beteiligten Institutionen und Personen, die sich an diesem erkenntnisreichen Vorhaben so aktiv beteiligt haben, aber insbesondere der Projektleiterin im BBK, Frau Christina Nikogosian sowie ihrer Projektmitarbeiterin Frau Isabelle Fischer für das hervorragende Projektmanagement. Ebenso danke ich den für dieses Projekt verantwortlichen Mitarbeiterinnen des Deutschen Wetterdienstes, Frau Dr. Tanja Winterrath sowie Frau Ewelina Walawender für die sehr gute und konstruktive Zusammenarbeit.

Die Herausforderungen, vor die uns der Klimawandel und seine Folgen stellen, werden wir nur gemeinsam meistern können!

Bonn, im Juli 2021



Dr. Wolfram Geier

Leiter der Abteilung II Risikomanagement,
internationale Angelegenheiten
Bundesamt für Bevölkerungsschutz und
Katastrophenhilfe

Grußwort

von Tobias Fuchs
Vorstand Klima und Umwelt des Deutschen Wetterdienstes



Liebe Leserinnen und Leser,

Starkregenereignisse verursachten in den letzten Jahrzehnten immense Schäden in Deutschland. Insbesondere die verheerenden Sturzfluten im Zuge des Tiefs "Bernd" im Juli diesen Jahres haben uns in schockierender Weise gezeigt, welch großes Schadenspotenzial Extremniederschlag entfalten kann. Aber auch die Überschwemmungen im Elbegebiet sowie die Ereignisse in Münster, Braunsbach und Simbach sind nur einige Beispiele für extreme Wetterauswirkungen innerhalb der letzten 20 Jahre. Angesichts der damit verbundenen hohen Belastung der Einsatzkräfte, u. a. des Technischen Hilfswerks (THW), stellt sich nicht nur die Frage, ob derartige extreme Ereignisse in Zukunft häufiger und stärker werden, sondern auch, inwieweit bereits heute Veränderungen im Auftreten von Starkregenereignissen zu beobachten sind. Für die Beantwortung dieser Frage können wir die seit rund 20 Jahren flächendeckende Erfassung des Niederschlags in Deutschland auf Basis des Wetterradarmessnetzes des Deutschen Wetterdienstes (DWD) nutzen. Mit diesem Bericht werfen wir nun einen intensiven Blick auf die Starkregenereignisse in den letzten zwei Jahrzehnten in Deutschland.

Die Strategische Behördenallianz „Anpassung an den Klimawandel“ führte seit 2010 drei gemeinsame Projekte zum Thema Starkregen im Klimawandel durch. Die Ergebnisse des ersten Projekts zeigten mit Blick in die Zukunft auf, dass im Rahmen des Klimawandels in den nächsten Jahrzehnten mit

einer Zunahme der Zahl extremer Niederschlagsereignisse zu rechnen ist. Im zweiten Projekt wurde mit der Entwicklung der Radarklimatologie (RADKLIM) die Grundlage für statistische Analysen des Auftretens von Starkregen seit 2001 gelegt. Eine wichtige Schlussfolgerung daraus: Eine Starkregengefährdung besteht in ganz Deutschland!

Das dritte Projekt, KlamEx, dessen Abschlussbericht nun vorliegt, stellt die Verbindung zwischen Starkregenereignissen, potenziellen Einflussfaktoren und der Schadenswirkung her. Dazu wurden extreme Niederschlagsereignisse in ihrer räumlichen und zeitlichen Ausprägung in einen Wirkzusammenhang mit Einsatzdaten von Feuerwehren und Hilfskräften gestellt.

Die grundlegende DWD-Frage lautete zu Beginn des Projekts: Wie ist eine objektive und aussagekräftige Klassifikation extremer Niederschlagsereignisse möglich? Das Ergebnis: ein Katalog, aus dem alle extremen Niederschlagsereignisse in Deutschland seit 2001 nach objektiven Kriterien ausgewählt, aufgelistet und mit einer Vielzahl meteorologischer und geografischer Attribute verknüpft werden können – neben der Größe, Andauer und Intensität des Ereignisses beispielsweise dem Versiegelungsgrad am Ort des Starkregens und der Umgebungstemperatur.

Auf dieser Grundlage konnten die charakteristischen Eigenschaften der Starkregenereignisse – vom konvektiven Gewitterregen bis zum großräumigen Dauerregen – beschrieben werden. Die

Daten zeigen für die letzten beiden Dekaden eine Verschiebung der Niederschlagscharakteristik hin zu kurzfristigen und kleinräumigen Starkregen sowie eine Zunahme der Stärke über alle Dauerstufen mit steigender Temperatur. Die Ergebnisse geben somit Hinweise auf eine Intensivierung und somit Erhöhung der potenziellen Schadenswirkung extremer Starkregenereignisse im Zuge der klimawandelbedingten Temperaturzunahme.

Weitere wichtige Leitfragen des Projekts lauteten: Gibt es einen Zusammenhang zwischen der Einsatzbelastung der Feuerwehren sowie Hilfskräfte und dem Starkregenvorkommen? Welche anderen Faktoren sind für die Schadenswirkung entscheidend? Wie können die Erkenntnisse in einer zukunftsweisenden Stadt- und Raumplanung sowie im Bereich des Bevölkerungsschutzes adressiert werden? Der vorliegende Bericht gibt Antworten auf diese Fragen – nicht nur in Form wissenschaftlicher Auswertungen, sondern auch praxisorientierter Handlungsempfehlungen.

Durch die enge Zusammenarbeit der beiden aktiv in die Projektarbeit involvierten Behörden – neben dem DWD auch das Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe – sowie die Unterstützung durch die Partnerbehörden Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) und THW ist ein Bericht entstanden, der eine Brücke zwischen fachlichem Wissen zum Starkniederschlag und der Praxis der Gefahrenabwehr im Bevölkerungsschutz schlägt.

Mein besonderer Dank gilt denjenigen, die durch ihre hervorragende Arbeit maßgeblich zum Erfolg des Projekts beigetragen haben, namentlich den Projektleiterinnen Frau Dr. Tanja Winterrath (DWD) und Frau Christina Nikogosian (BBK) sowie ihren Projektmitarbeiterinnen Frau Ewelina Walawender (DWD) und Frau Isabelle Fischer (BBK).

Abschließend möchte ich darauf hinweisen, dass der Deutsche Wetterdienst (DWD) sowohl die Radarklimadaten als auch den Katalog der Starkregenereignisse jährlich fortschreiben und publizieren wird und diese über sein „Climate Data Center“ (<https://cdc.dwd.de>) kostenfrei zur Verfügung stellt. Sie sind herzlich zur Nutzung der DWD-Daten und Produkte eingeladen!

Ich freue mich, dass wir Ihnen nun mit dem vorliegenden Abschlussbericht die Ergebnisse des Projekts KlamEx präsentieren dürfen. Ich wünsche Ihnen auf Basis dieses Berichts spannende neue Erkenntnisse zum Thema Starkregen.

Viel Spaß bei der Lektüre!

Offenbach, im Juli 2021



Tobias Fuchs
Vorstand Klima und Umwelt des Deutschen
Wetterdienstes



Inhalt

Vorwort	4
Grußwort	6
Danksagung	22
Executive Summary	23
1. Einleitung	26
1.1 Kernthemen des Projekts KlamEx.....	29
1.2 Überblick über nationale und internationale Aktivitäten zum Thema ereignisbezogene Starkregenanalyse.....	30
1.3 Einordnung in Forschungsaktivitäten zur Ermittlung der Starkregengefährdung im urbanen Raum.....	31
1.4 Einordnung in Forschungsaktivitäten im Bevölkerungsschutz.....	32
1.5 Rechtliche Zuständigkeit des Katastrophenschutzes in Deutschland bei der Vor- und Nachsorge von Starkregenereignissen.....	33
2. Extremniederschlag im Klimawandel	36
2.1 Niederschlagstrends.....	38
2.1.1 Beobachtung.....	38
2.1.2 Klimaprojektionen.....	38
2.2 Temperaturtrends.....	39
2.2.1 Beobachtung.....	39
2.2.2 Klimaprojektionen.....	39
2.3 Der Clausius-Clapeyron-Effekt.....	39
2.4 Stadtklimaeffekt.....	40
2.5 Persistenz extremer Wetterlagen.....	42
2.6 Fragestellungen.....	42
3. Datengrundlage und Konzepte	44
3.1 RADKLIM.....	45
3.1.1 Niederschlagsdaten.....	45
3.1.2 Statistische Niederschläge.....	47
3.2 TRJ-Basisdaten.....	47

3.3	Geodaten	48
3.4	Die Warnschwellen des DWD	48
3.5	Die Extremität	49
3.6	Der Vorregenindex.....	49
3.7	Der Starkregenindex (SRI).....	50
3.8	Die Objektive Wetterlagenklassifikation.....	50
4.	Der Ereigniskatalog – Methodik.....	52
4.1	Ereignisdefinition.....	53
4.1.1.	Bestimmung extremer Niederschlagsobjekte	53
4.1.2.	Bestimmung extremer Niederschlagsereignisse.....	54
4.2	Die Verknüpfung mit Attributen	54
4.3	Vergleich der verschiedenen Kataloge.....	56
4.4	Technische Umsetzung und Datenformate	61
4.4.1.	Die Ereignisdetektion (Python)	61
4.4.2.	Der Ereigniskatalog in ArcGIS	61
4.4.3.	Der Ereigniskatalog als Online-Dashboard.....	63
5.	Der Ereigniskatalog – Ergebnisse und Analysen	64
5.1	Ranking.....	65
5.1.1.	Ranking der durch Extremereignisse betroffenen Großstädte.....	69
5.2	Statistische Analysen.....	69
5.2.1.	Räumliche Statistik.....	69
5.2.2.	Zeitliche Statistik	73
5.3	Zusammenhangsanalysen.....	79
5.3.1.	Meteorologische Attribute.....	79
5.3.1.1.	Temperatur – Der Clausius-Clapeyron-Effekt.....	79
5.3.1.2.	Wetterlagen.....	89
5.3.2.	Geoattribute.....	96
5.3.2.1.	Urbanisierung – Der Stadtklimaeffekt.....	96
6.	Einsatzdaten – Erfassung und Analyseoptionen	104
6.1	Untersuchung angewandter Dokumentationsweisen unwetterbedingter Einsätze.....	105
6.2	Verwendung von Feuerwehreinsatzdaten für unwetterbezogene Analysen	113
6.2.1.	Entscheidung für einen Ereigniskatalog	115
6.2.2.	Plausibilisierung starkregenbedingter Einsätze	115
6.2.3.	Umgang mit Ereignissen in Gebietsrandzonen.....	117

6.3	Verwendung von Einsatzdaten des THW für unwetterbezogene Analysen	118
6.4	Durchführung leitfadengestützter Experteninterviews	119
6.5	Durchführung von Dialogveranstaltungen	120
7.	Verknüpfung von Ereignis- und Einsatzdaten	122
7.1	Explorative Zusammenhangsanalysen	123
7.2	Zusammenhangsanalysen zur Ermittlung von Einflussfaktoren	126
7.3	Fallstudien	134
7.3.1.	Aachen und Wuppertal	134
7.3.1.1.	Meteorologische Ereignisbeschreibung	136
7.3.1.2.	Schadensausmaß	137
7.3.1.3.	Einsatzgeschehen	138
7.3.1.4.	Analyse von Einflussfaktoren auf die Bildung von Einsatzschwerpunkten	140
7.3.2.	Bad Doberan	146
7.3.2.1.	Meteorologische Ereignisbeschreibung	146
7.3.2.2.	Schadensausmaß	147
7.3.2.3.	Einsatzgeschehen	147
7.3.2.4.	Analyse von Einflussfaktoren auf die Bildung von Einsatzschwerpunkten	148
7.3.3.	Region Bamberg-Forchheim	151
7.3.3.1.	Meteorologische Ereignisbeschreibung	152
7.3.3.2.	Schadensausmaß	152
7.3.3.3.	Einsatzgeschehen	153
7.3.3.4.	Analyse von Einflussfaktoren auf die Bildung von Einsatzschwerpunkten	154
7.3.4.	Köln	157
7.3.4.1.	Meteorologische Ereignisbeschreibung	158
7.3.4.2.	Schadensausmaß	158
7.3.4.3.	Einsatzgeschehen	159
7.3.4.4.	Analyse von Einflussfaktoren auf die Bildung von Einsatzschwerpunkten	160
7.3.5.	Nordwalde	165
7.3.5.1.	Meteorologische Ereignisbeschreibung	166
7.3.5.2.	Schadensausmaß	166
7.3.5.3.	Einsatzgeschehen	166
7.3.5.4.	Analyse von Einflussfaktoren auf die Bildung von Einsatzschwerpunkten	167

7.3.6.	Potsdam und Umgebung	171
7.3.6.1.	Meteorologische Ereignisbeschreibung.....	172
7.3.6.2.	Schadensausmaß.....	172
7.3.6.3.	Einsatzgeschehen	173
7.3.6.4.	Analyse von Einflussfaktoren auf die Bildung von Einsatzschwerpunkten.....	173
7.3.7.	Vergleich der Fallstudien	177

8.	Empfehlungen zum Umgang mit Starkregen im Bevölkerungsschutz und in der Stadtentwicklung.....	180
8.1	Maßnahmenvorschläge für den Bevölkerungsschutz.....	181
8.1.1.	Präventive Maßnahmen.....	182
8.1.1.1.	Sicherstellung der Einsatzfähigkeit.....	183
8.1.1.2.	Anpassung der Einsatz- und Personalmittel	183
8.1.1.3.	Vorplanung einer Einsatz- und Führungsstruktur	186
8.1.1.4.	Effektive Risikokommunikation und Stärkung des Selbstschutzes.....	190
8.1.1.5.	Stärkere Verankerung des Themas in Übungen, Aus- und Fortbildung .	192
8.1.1.6.	Aufbau von Netzwerken.....	193
8.1.1.7.	Systematische Erfassung starkregenbedingter Einsätze.....	194
8.1.2.	Vorbereitende Maßnahmen	200
8.1.2.1.	Früherkennung von Starkregen und Sturzfluten.....	200
8.1.2.2.	Warnung/Alarmierung der Bevölkerung	203
8.1.2.3.	Vorbereitende Maßnahmen in der Leitstelle.....	204
8.1.2.4.	Vorbereitende Maßnahmen in der Einsatzorganisation.....	205
8.1.3.	Maßnahmen der Bewältigung	205
8.1.3.1.	Erst- und Folgemaßnahmen in der Einsatzorganisation	205
8.1.3.2.	Aspekte der Führung.....	206
8.1.3.3.	Krisenkommunikation.....	208
8.1.3.4.	Einbindung und Koordination von Spontanhelfenden	208
8.1.4.	Maßnahmen der Nachsorge	209
8.1.5.	Fazit zu den Maßnahmen im Bevölkerungsschutz	210
8.2	Maßnahmenvorschläge für die Stadtentwicklung.....	210

9. Fazit und Ausblick.....	215
10. Literatur.....	220
11. Anhang.....	228
11.1 Interviewleitfaden	229
11.2 Abbildungen und Tabellen	231
Glossar.....	242

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	In KlamEx verwendete geografische Parameter mit Auflösung und Datenquelle.....	48
Tab. 2:	Schwellenwerte für die Mindestfläche eines Ereignisses sowie die Niederschlagsmengen entsprechend einer Wiederkehrzeit von 5 Jahren und der Warnstufe 3 (linear interpoliert für nicht definierte Dauerstufen).....	49
Tab. 3:	Werte des SRI mit Farblegende nach http://abwassernetzwerk-rheinland.nrw/starkregenvorsorge/	50
Tab. 4:	Ranking der deutschen Großstädte mit einer Einwohnerzahl > 200.000 entsprechend der Betroffenheit durch Extremereignisse.	67
Tab. 5:	Auflistung ausgewählter Ereignisattribute in Abhängigkeit der vorherrschenden Wetterlage der OWLK des DWD.....	95
Tab. 6:	Auflistung aller Ereignisse pro Sektor aufgeteilt nach der Hauptanströmrichtung der OWLK zur Untersuchung des Stadteffekts Bremen	100
Tab. 7:	Möglichkeit der Zuordnung von Einsätzen zur Einsatzursache Extremwetter nach Einschätzung der Befragungsteilnehmenden.....	110
Tab. 8:	Zusammenhangsanalyse von Ereignis und Einsatz.....	125
Tab. 9:	Korrelationen zwischen der Einsatzanzahl und den Meteo- sowie Geovariablen.....	132
Tab. 10:	Korrelationsrechnungen für Aachen und Wuppertal	141
Tab. 11:	Korrelationsrechnungen für Bad Doberan.....	148
Tab. 12:	Korrelationsrechnungen für die Region Bamberg Forchheim.....	155
Tab. 13:	Korrelationsrechnungen für Köln	160
Tab. 14:	Korrelationsrechnungen für Nordwalde.....	168
Tab. 15:	Korrelationsrechnungen für Potsdam und Umgebung	175
Tab. 16:	Vorschlag für ein Kernset an Erhebungsmerkmalen für eine gemeinsame Auswertung von Einsatz- und Wetterdaten	198
Tab. 17:	Bewertungsmatrix für Einflussfaktoren auf das Einsatzgeschehen zur Einschätzung durch die Interviewpartner	229
Tab. 18:	CatRaRE Felder Beschreibung	231

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Die Bevölkerungsschutz-Pyramide in Deutschland.....	34
Abb. 2:	Jährlicher Prozentsatz fehlender RW-Produkte des RADKLIM-Datensatzes 2017.002 von 2001 bis 2019	46
Abb. 3:	Schematische Übersicht über die externen Attribute des Ereigniskatalogs	55
Abb. 4:	Anzahlen extremer Niederschlagsereignisse pro RADKLIM-Pixel in Deutschland für die Jahre 2001 bis 2019	57
Abb. 5:	Differenz der Niederschlagsschwellenwerte der Kataloge nach statistischem Niederschlag mit einer Wiederkehrzeit von 5 Jahren (T5) und nach Warnstufe 3 (W3).....	58
Abb. 6:	Jährliche Anzahl extremer Niederschlagsereignisse in Deutschland zwischen 2001 und 2019 nach Katalog W3_Eta	59
Abb. 7:	wie Abbildung 6, aber für den Katalog T5_Eta	59
Abb. 8:	Jährliche Gesamtfläche extremer Niederschlagsereignisse in Deutschland zwischen 2001 und 2019 für den Katalog W3_Eta.....	60
Abb. 9:	wie Abbildung 8, aber für den Katalog T5_Eta	60
Abb. 10:	Screenshot der KlamEx-Toolbox in ArcGIS	61
Abb. 11:	Schematische Darstellung der technischen Formate der Ereigniskataloge in den verschiedenen Entwicklungsschritten	63
Abb. 12:	Die 10 extremsten Niederschlagsereignisse langer (links) und kurzer (rechts) Dauerstufen von 2001 bis 2019 in Deutschland	66
Abb. 13:	Jährliche Ereignisanzahl pro Pixel für die Jahre 2001 bis 2019.....	70
Abb. 14:	Monatliche Ereignisanzahl pro Pixel für die Jahre 2001 bis 2019 (Summe).....	71
Abb. 15:	Mittlere Ereignisanzahl pro Land, Kreis, Gemeinde und Flusseinzugsgebiet (von links nach rechts) für Ereignisse kurzer (oben), mittlerer (Mitte) und langer (unten) Dauerstufen	72
Abb. 16:	Jährliche Gesamtfläche extremer Niederschlagsereignisse in Deutschland zwischen 2001 und 2019	73
Abb. 17:	Jährliche Anzahl extremer Niederschlagsereignisse in Deutschland zwischen 2001 und 2019	74

Abb. 18:	Monatliche Anzahl der Ereignisse von 2001 bis 2019, summiert über alle Pixel des räumlichen Abdeckungsgebiets	75
Abb. 19:	Tägliche Anzahl der Ereignisse von 2001 bis 2019, summiert über alle Pixel des räumlichen Abdeckungsgebiets	76
Abb. 20:	Monatliche Summen der Ereignisflächen von 2001 bis 2019, summiert über alle Pixel des räumlichen Abdeckungsgebiets.....	77
Abb. 21:	Ereignisanzahl (Farbcodierung) nach Wochentag (Zeilen) und Uhrzeit (Spalten) des Ereignisstarts für alle Ereignisse zwischen 2001 und 2019 für alle Dauerstufen.....	78
Abb. 22:	Ereignisanzahl (Farbcodierung) nach Wochentag (Zeilen) und Uhrzeit (Spalten) des Ereignisstarts für alle Ereignisse zwischen 2001 und 2019 mit einer charakteristischen Dauerstufe von bis zu 6 Stunden	78
Abb. 23:	Ereignisanzahl (Farbcodierung) nach Kalendermonat (Zeilen) und Monatstag (Spalten) des Ereignisstarts für alle Ereignisse zwischen 2001 und 2019 für alle Dauerstufen.....	79
Abb. 24:	Anzahl aller extremen Niederschlagsereignisse in den Jahren 2001 bis 2012 in Abhängigkeit der 2-m-Temperatur zum Zeitpunkt 2 Stunden vor dem Ereignisbeginn	81
Abb. 25:	Anzahl aller extremen Niederschlagsereignisse in den Jahren 2001 bis 2012 in Abhängigkeit der 2-m-Temperatur zum Zeitpunkt des Ereignisbeginns	81
Abb. 26:	Anzahl aller extremen Niederschlagsereignisse in den Jahren 2001 bis 2012 in Abhängigkeit der über die Ereignisdauer gemittelten 2-m-Temperatur	82
Abb. 27:	Abhängigkeit verschiedener Ereignisattribute (s. Text) von der 2-m-Temperatur 2 Stunden vor dem Startzeitpunkt für alle einstündigen Ereignisse zwischen 2001 und 2012.....	83
Abb. 28:	wie Abbildung 27, aber für die mittlere Temperatur über die Ereignisdauer.....	84
Abb. 29:	wie Abbildung 27, aber für die Ereignisse aller Dauerstufen.....	85
Abb. 30:	wie Abbildung 27, aber für alle konvektiven Ereignisse mit charakteristischen Dauerstufen bis zu 6 Stunden	86
Abb. 31:	wie Abbildung 27, aber für alle stratiformen Ereignisse mit charakteristischen Dauerstufen von 9 Stunden und länger.....	87
Abb. 32:	Ereignisanzahl für die Jahre 2001 bis 2019 aufgeteilt nach den trockenen Wetterlagen der objektiven Wetterlagenklassifikation des DWD.....	90
Abb. 33:	wie Abbildung 32, aber für feuchte Wetterlagen	91
Abb. 34:	Ereignisanzahl pro Wetterlage der objektiven Wetterlagenklassifikation des DWD für den Zeitraum 2001 bis 2019.....	92

Abb. 35:	Akkumulierte Ereignisfläche pro Wetterlage der objektiven Wetterlagenklassifikation des DWD für den Zeitraum 2001 bis 2019	92
Abb. 36:	Jährliche akkumulierte Ereignisfläche pro Jahr für alle Dauerstufen	93
Abb. 37:	Jährliche akkumulierte Ereignisfläche pro Jahr für kurze Dauerstufen von einer bis 9 Stunden	93
Abb. 38:	Jährliche akkumulierte Ereignisfläche pro Jahr für lange Dauerstufen von 12 bis 72 Stunden	94
Abb. 39:	Einteilung der Stadt Bremen und Umgebung in Sektoren entsprechend der Himmelsrichtung und Entfernung von der Stadtgrenze	97
Abb. 40:	Skalierte Ereignisanzahlen pro Segment in Abhängigkeit der Anströmrichtung der objektiven Wetterlagenklassifikation für Starkregen (oben) und Dauerregenereignisse (unten)	98
Abb. 41:	Skalierte Ereignisflächen pro Segment in Abhängigkeit der Anströmrichtung der objektiven Wetterlagenklassifikation für Starkregen (oben) und Dauerregenereignisse (unten)	99
Abb. 42:	Formen der aktuell angewendeten Verfahren zur Einsatzdokumentation.	106
Abb. 43:	Möglichkeiten zur Definition eines Einsatzes.	107
Abb. 44:	Zählweise von Einsätzen	108
Abb. 45:	Enthaltene Informationen in Einsatzdatensätzen.	110
Abb. 46:	Verwendete Stichworte für unwetterbedingte Einsätze	111
Abb. 47:	Einsatzdatengebiete im Projekt KlamEx (Quelle der Karte: GADM 2018)	114
Abb. 48:	Plausibilisierungsschema für die Zuordnung von Einsätzen zu Ereignissen	116
Abb. 49:	Anzahl starkregenbedingter Einsätze des THW im Zeitraum von 2006 bis 2019	119
Abb. 50:	Anzahl der Starkniederschlagsereignisse und korrespondierenden Feuerwehreinsätze 2013-2019 für ausgewählte Kommunen Deutschlands.	124
Abb. 51:	Verteilung der Ereignisse und Einsätze auf die Monate für die Jahre 2013-2019	124
Abb. 52:	Anzahl der Pixel der gewählten Einsatzdatenklassen	127
Abb. 53:	Zusammenhang zwischen ausgewählten Geoparametern und Einsatzanzahlen über alle zur Verfügung gestellten Einsatzdatensätze	128

Abb. 54:	Zusammenhang zwischen der Einsatzanzahl (Größe der Kreise), der Stundenanzahl > Warnstufe 3 (Farbe), dem Versiegelungsgrad (x-Achse) und dem TPI (y-Achse).....	129
Abb. 55:	Erste Abschätzung einer Starkniederschlagsgefahrenkarte für die Stadt Aachen auf der Basis kombinierter Katalogattribute mit hoher Korrelation zu den verfügbaren Einsatzdaten	130
Abb. 56:	Verteilung aller Starkregenereignisse von 2013-2018 mit dazugehörigen Feuerwehreinsätzen in der Städtereion Aachen (Wischott 2020)	135
Abb. 57:	Verteilung aller Starkregenereignisse von 2007-2018 mit dazugehörigen Feuerwehreinsätzen in Wuppertal.....	137
Abb. 58:	Einsatzaufkommen in Aachen und Monschau (südlich) am 29.05.2018 mit Schwerpunkten rund um die Region des Kaiserplatzes	139
Abb. 59:	Einsatzaufkommen in Wuppertal infolge des Starkregenereignisses am 29.05.2018	140
Abb. 60:	Factsheet zum Ereignis vom 29. Mai 2018 in Aachen.....	143
Abb. 61:	Factsheet zum Ereignis vom 29. Mai 2018 in Wuppertal.....	144
Abb. 62:	Beurteilung von Einflussfaktoren auf die Herausbildung von Einsatzstellen bei Starkregen aus Sicht des Interviewpartners der Feuerwehr Aachen	145
Abb. 63:	Anzahl der Ereignisse und Einsätze in Bad Doberan für die Jahre 2002 – 2019.....	146
Abb. 64:	Verteilung der Einsätze in Bad Doberan am 31.07.2019. Zu sehen ist eine starke Häufung im Stadtgebiet von Bad Doberan.....	147
Abb. 65:	Einsatz der Feuerwehr	149
Abb. 66:	Factsheet zum Ereignis vom 31. Juli 2019 in Bad Doberan.....	150
Abb. 67:	Anzahl der Ereignisse und Einsätze in der Region Bamberg-Forchheim für die Jahre 2014 bis 2019.....	151
Abb. 68:	Überflutung und Pumparbeiten nach Starkregen in Heroldsbach.....	152
Abb. 69:	Verteilung der Einsätze vom 05.07.2018 in der Region Bamberg-Forchheim	153
Abb. 70:	Vergleich der Anzahl von Einsätzen und eingesetzten Kräften für verschiedene Einsatzdauern am Beispiel des Starkregenereignisses in der Region Bamberg-Forchheim am 05.07.2018.....	154
Abb. 71:	Factsheet zum Ereignis vom 5. Juli 2018 in Bamberg	156
Abb. 72:	Beurteilung von Einflussfaktoren auf die Herausbildung von Einsatzstellen bei Starkregen aus Sicht der beiden Interviewpartner in der Region Bamberg-Forchheim	157

Abb. 73:	Anzahl der Ereignisse und Einsätze in Köln für die Jahre 2013 – 2019	158
Abb. 74:	Verteilung der Einsätze am 19. und 20.07.2017 in Köln.....	159
Abb. 75:	Factsheet zum Ereignis vom 19. Juli 2017 in Köln	162
Abb. 76:	Factsheet zum Ereignis vom 20. Juli 2017 in Köln	163
Abb. 77:	Starkregengefahrenkarte für Köln mit den Einsätzen des Doppelereignisses 19./20.07.2017.....	164
Abb. 78:	Verteilung der Einsätze auf die Ereignisse in den Jahren 2010 und 2014 in der Gemeinde Nordwalde	165
Abb. 79:	Einsatzarbeiten der Feuerwehr Nordwalde am überfluteten Pumpwerk Denkerstiege nach Starkregen im August 2010	166
Abb. 80:	Überflutete Zufahrt in der Bauernschaft Scheddebrock nach Starkregen im August 2010	166
Abb. 81:	Verteilung der Einsätze vom 26.-28.08.2010 in Nordwalde und Umgebung.....	167
Abb. 82:	Factsheet zum Ereignis am 26. und 27. August 2010 in Nordwalde	169
Abb. 83:	Beurteilung von Einflussfaktoren auf die Herausbildung von Einsatzstellen bei Starkregen aus Sicht des Interviewpartners der Gemeinde Nordwalde.....	170
Abb. 84:	Anzahl der Ereignisse und Einsätze in Potsdam und Umgebung für die Jahre 2015 bis 2019.....	171
Abb. 85:	Verteilung der Einsätze am 29.06. – 30.06.2017 in Potsdam und Umgebung	172
Abb. 86:	Einsatz der Feuerwehr Potsdam nach dem Starkregenereignis im Juni 2017	173
Abb. 87:	Factsheet zum Ereignis am 29. und 30. Juni 2017 in Potsdam.....	174
Abb. 88:	Beurteilung von Einflussfaktoren auf die Herausbildung von Einsatzstellen bei Starkregen aus Sicht des Interviewpartners der Feuerwehr Potsdam.....	176
Abb. 89:	Kombinierter Zusammenhang zwischen den Parametern TPI (y-Achse), Versiegelungsgrad (x-Achse), Niederschlagsintensität (Farbe) und resultierenden Einsätzen (Größe der Kreise) für die betrachteten Starkregenereignisse	178
Abb. 90:	Ganzheitlicher Ansatz des Risiko- und Krisenmanagements.....	182
Abb. 91:	Löschgruppenfahrzeug für den Katastrophenschutz.....	185
Abb. 92:	Vorschlag einer BAO „Starkregen/Sturzflut“, Phase 1.....	187

Abb. 93:	Vorschlag einer BAO „Starkregen/Sturzflut“, Phase 2	189
Abb. 94:	Übersicht über wichtige beteiligte Akteure im Starkregenrisikomanagement	194
Abb. 95:	Auszug der Aufgaben einer Einsatzleitung	207
Abb. 96:	Wöchentliche Anzahl der Ereignisse von 2001 bis 2019, summiert über alle Pixel des räumlichen Abdeckungsgebiets	233
Abb. 97:	Erste Abschätzung einer Starkniederschlagsgefahrenkarte für die Stadt Bad Doberan auf der Basis kombinierter Katalogattribute mit hoher Korrelation zu den verfügbaren Einsatzdaten	234
Abb. 98:	wie Abbildung 97, aber für die Region Bamberg-Forchheim	235
Abb. 99:	wie Abbildung 97, aber für die Stadt Köln	236
Abb. 100:	wie Abbildung 97, aber für die Gemeinde Nordwalde	237
Abb. 101:	wie Abbildung 97, aber für die Stadt Potsdam	238
Abb. 102:	wie Abbildung 97, aber für die Region Westbrandenburg	239
Abb. 103:	wie Abbildung 97, aber für die Stadt Wuppertal	240

Danksagung

Große Teile der in KlamEx erarbeiteten und in diesem Projektbericht vorgestellten Inhalte wurden erst durch die Mitwirkung Externer ermöglicht. Ganz besonders hervorzuheben sind hierbei die Kommunen, die sich an der Befragung zur Dokumentation unwetterbedingter Einsätze beteiligt haben, sowie die Feuerwehren, die dem BBK ihre Einsatzdatensätze für die projektinternen Auswertungen zur Verfügung gestellt haben. Ohne diese Datensätze wären viele Analysen nicht möglich gewesen. Auch die zahlreichen begleitenden Gespräche mit Experten aus der Praxis rund um das Thema Einsatz(-erfassung) bei Extremwetterlagen haben wesentlich zu einer Erweiterung des Verständnisses bezüglich der Auswirkungen von und den Umgang mit Starkregen im Katastrophenschutz beigetragen. Ihnen allen gilt unser aufrichtiger Dank. Den Kolleginnen und Kollegen aus den Katastrophenschutzreferaten der Landesinnenministerien danken wir für ihre Kooperation und Unterstützungsbereitschaft bei der Verteilung der Einladung zur Teilnahme an der Befragung sowie ihr Interesse am Austausch über die Projekthinhalte und -ergebnisse.

Ebenso bedanken wir uns ganz herzlich bei Daniel Schmitz-Kröll, dessen praxisnahe Erarbeitung zu den Einsatzerfahrungen bei Starkregen und Sturzfluten in Teilen in die Handlungsempfehlungen eingeflossen ist. Weiterhin danken wir Valerie Wischott und Dennis Hurschmann, die ihre Studienabschlussarbeiten im Rahmen dieses Projekts verwirklicht haben und mit ihren Ausarbeitungen manche Lücke in der Bearbeitung schließen konnten.

Besonderer Dank gilt Dr. Katharina Lengfeld, welche die Grundlagen des Ereigniskatalogs entwickelt und die Weiterentwicklungen im Rahmen von KlamEx fachlich und technisch begleitet hat.

Das Projektteam, Juli 2021

Executive Summary

Problemstellung und Relevanz der Forschungsarbeit

Extremwetterereignisse wie Starkniederschläge stellen sowohl für den Katastrophenschutz als auch die Stadt- und Raumplanung eine enorme Herausforderung dar. Klimaprojektionen deuten darauf hin, dass sich die Anzahl und die Intensität von Extremwettern durch den globalen Klimawandel in Zukunft noch weiter erhöhen könnten. Umso wichtiger werden Erkenntnisse bezüglich der Entwicklung von Häufigkeit und Ausprägung extremer Wetterereignisse, insbesondere Starkregen, und die damit verbundenen Folgen für das Einsatzgeschehen und die urbanen Lebensräume in Deutschland. Um diese Frage adressieren zu können, bedurfte es zunächst einer umfassenden Analyse der aktuellen Situation. Bislang waren meteorologische Statistiken zu Starkregen auf lokale Messwerte beschränkt; Informationen über den räumlichen und zeitlichen Charakter der Extremereignisse wurden nicht systematisch analysiert. Damit fehlten sowohl ereignisspezifische Informationen, welche die Extremität eines Starkniederschlags entscheidend mitbestimmen, als auch Informationen zur räumlichen Betroffenheit einer Region im Fall eines schadensträchtigen Ereignisses. Eine vergleichende, datengestützte Betrachtung der Einsatzbelastung im Zusammenhang mit der Bewältigung dieser Ereignisse wurde zudem durch die Heterogenität der erfassten Einsatzdaten erschwert. Eine umfassende Charakterisierung und Dokumentation extremer Niederschlagsereignisse und ihrer Auswirkungen ist jedoch die Grundvoraussetzung, um Änderungen in der Anzahl und Intensität dieser Ereignisse zu erkennen, relevante Wirkkomponenten für ihre Auswirkungen zu identifizieren und differenzierte Handlungsoptionen für den Bevölkerungsschutz und die Stadtentwicklung zu benennen. Die Strategische Behördenallianz „Anpassung an den Klimawandel“ adressierte diese Herausforderungen im Rahmen des Projekts KlamEx.

Die Ergebnisse sind für den Bevölkerungsschutz und die Raumordnung, Regional- und Bauleitplanung von hoher Bedeutung. Beide Themen werden in der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) als Querschnittsfelder adressiert und in den Vulnerabilitätsanalysen, insbesondere im Hinblick auf ihren Beitrag zur Erhöhung der Anpassungskapazität in den anderen in der DAS genannten Handlungsfeldern, betrachtet. Um diese Funktion erfüllen zu können, muss gewährleistet sein, dass die beiden Querschnittsfelder nicht selbst von den Auswirkungen des Klimawandels in einer einschränkenden Weise betroffen sind. Dies setzt hinsichtlich des Bevölkerungsschutzes fundierte Kenntnisse bezüglich der Einsatzbelastung aufgrund von extremen Wetterereignissen voraus, um frühzeitig und angemessen auf Einschränkungen in der Hilfeleistungsfähigkeit reagieren zu können.

Theoretischer Hintergrund und Methodik

Das Schadenspotenzial extremer Niederschlagsereignisse hängt sowohl von der Niederschlagsintensität und Andauer als auch der räumlichen Ausdehnung ab. In der Zusammenschau erlauben diese Parameter eine objektive Einschätzung der Extremität. Eine objektorientierte Charakterisierung ermöglicht statistische Analysen potenziell schadensträchtiger Niederschlagsereignisse in ihrer gesamten Ausprägung. Die Verknüpfung der Ereignisattribute mit den Temperaturdaten der Umgebung ermöglicht dabei auch einen Blick in die Zukunft. Die Theorie dahinter: Mit jedem Kelvin Temperaturzunahme erhöht sich nach Clausius-Clapeyron der Sättigungsdampfdruck des Wassers im atmosphärischen Temperatur- und Druckbereich um etwa 7 %. Warme Luftmassen können folglich mehr Wasserdampf aufnehmen als kalte. Dadurch steigt mit der Temperatur auch das Starkregenpotenzial einer Luftmasse. Die potenzielle Schadwirkung eines

Starkregenereignisses hängt dabei maßgeblich von den lokalen Gegebenheiten ab.

Auf Grundlage der radarbasierten Niederschlagsklimatologie RADKLIM wurde ein Katalog extremer Niederschlagsereignisse in Deutschland für die Zeit ab 2001 erstellt. Die Daten beinhalten neben der Niederschlagsintensität Informationen zur räumlichen Ausdehnung und Andauer der Ereignisse, die wesentliche Aspekte im Hinblick auf die Extremität und die potenzielle Schadwirkung darstellen. Der zusätzlich mit einer Vielzahl meteorologischer und geografischer Attribute sowie bereitgestellten Einsatzdaten von Feuerwehren gekoppelte Ereignisdatensatz lieferte die Grundlage für die im Projekt durchgeführten statistischen Auswertungen. Mit der Analyse von Ereignishäufigkeiten wurden regionale Verbreitungsmuster und Hotspots von Stark- und Dauerregenereignissen der letzten 19 Jahre ermittelt. Im Hinblick auf eine potenzielle Änderung der Starkregencharakteristik durch den Klimawandel wurde die Abhängigkeit charakteristischer Ereigniseigenschaften von der Temperatur analysiert.

Mit Fokus auf den besiedelten Raum wurden Zusammenhänge zwischen Einsatzorten bei Starkregenvorkommen und siedlungsspezifischen Parametern untersucht. Der ereignisbezogenen Auswertung einzelner Einsatzdatensätze ging dabei eine Befragung von Kommunen zur Dokumentation unwetterbedingter Einsätze voraus, um einen Überblick über die aktuell angewendeten Verfahren und die Vergleichbarkeit der Datensätze zu gewinnen. Auf dieser Grundlage wurde eine Methodik zur Verknüpfung mit dem Ereigniskatalog entwickelt. Den getroffenen Aussagen über die Auswirkungen von Starkregenereignissen auf Siedlungsgebiete und den Katastrophenschutz wurden explorative Zusammenhangsanalysen, Korrelationsrechnungen zwischen Einsatzanzahlen und meteorologischen sowie nichtmeteorologischen Attributen und ausgewählte Fallstudien zugrunde gelegt. Für diese Fallstudiengebiete wurden auf Basis der Korrelationsrechnungen Karten potenzieller Starkregengefährdung erstellt. Qualitative Erkenntnisse aus leitfadengestützten Experteninterviews mit Feuerwehrkräften ergänzen die datenbasierten Analysen. Aus der synthetischen Betrachtung der erzielten Ergebnisse wurden

Handlungsempfehlungen für den Bevölkerungsschutz und die Stadtentwicklung abgeleitet.

Ergebnisse

Der neue Ereigniskatalog umfasst alle Starkregenereignisse in Deutschland seit 2001. Das online bereitgestellte Dashboard ermöglicht die anwendungsfreundliche Selektion und GIS-basierte Visualisierung – zum Beispiel für ausgewählte Bundesländer oder Landkreise.

Die räumliche Verteilung aller Extremereignisse zeigt: Starkregen kurzer Dauerstufen und hoher Wiederkehrzeiten ist in den betrachteten 19 Jahren in allen Regionen Deutschlands aufgetreten. Das bedeutet: Überall in Deutschland besteht eine potenzielle Starkregengefährdung. Dabei ist den vorliegenden Zusammenhangsanalysen zwischen den Ereignisparametern und der Umgebungstemperatur zufolge im Rahmen der klimawandelbedingten Temperaturzunahme mit einer Intensivierung extremer Niederschlagsereignisse zu rechnen – dies gilt sowohl für konvektive als auch für flächenhafte Niederschlagsereignisse. Mit steigender Temperatur nimmt zudem der Anteil konvektiver auf Kosten stratiformer Niederschlagsereignisse zu. Das bedeutet: In einer wärmeren Umgebung fällt der Niederschlag häufiger als kleinräumiger Starkregen denn in Form eines großflächigen Dauerregens. Diese bislang in der Fachliteratur nur als Hypothese formulierte Änderung der Niederschlagscharakteristik konnte erstmals direkt anhand der Daten gezeigt werden. Die Ergebnisse deuten weiterhin darauf hin, dass die extremen Starkregen kurzer Andauer – typischerweise lokale Gewitter – mit steigenden Temperaturen deutlich großflächiger und etwas intensiver werden, was in einem höheren Gesamtniederschlag der Ereignisse – summiert über die Andauer und Fläche – und in einer potenziell höheren Schadwirkung resultiert.

Die konkrete Gefahr durch Starkregen ist dabei entscheidend von den örtlichen Gegebenheiten abhängig. Der Zusammenhangsanalyse zwischen Ereignis- und Einsatzdaten zufolge werden Jahre mit einer Vielzahl von Ereignissen zwar häufig auch von einer hohen Anzahl an Einsätzen begleitet. Dennoch löst nicht jedes über einem besiedelten Gebiet auftretende Ereignis *per se* auch Schäden und daraus

folgende Einsätze aus. Als maßgebende Faktoren auf die Herausbildung von Einsatzstellen wurden die lokale Topografie und der Urbanisierungsgrad – hier parametrisiert durch Versiegelungsgrad, Siedlungsgrad und Einwohnerzahl – identifiziert. Einsatzorte der Feuerwehren liegen demnach signifikant häufiger in Senken sowie an Orten mit einem hohen Maß an Flächenversiegelung – das zeigten die im Projekt durchgeführten Fallstudien. Dabei scheinen die Niederschlagsmenge und intensität umso weniger eine Rolle bei der Anzahl der Einsätze zu spielen, je stärker die Topografie einflussgebend ist. Auch wenn der Niederschlagsschwerpunkt außerhalb eines Siedlungsgebietes liegt, kann es dem Geländeprofil entsprechend zu einer horizontalen Verlagerung der Wassermassen durch Abflussvorgänge kommen, die in dem Siedlungsgebiet trotz geringerer lokaler Niederschlagssummen Schäden verursachen. Gleichwohl wird die Entstehung von Einsatzstellen auch von nichtquantifizierbaren Faktoren bestimmt, darunter das Risikobewusstsein und der Informationsgrad der Bevölkerung sowie insbesondere deren Fähigkeit zur Vorsorge und Selbsthilfe. Letztere kann die Anzahl der Einsätze und damit die Einsatzbelastung aufgrund eines Extremwetterereignisses substanziell verringern, wie eines der Fallbeispiele offenbarte.

Die Ergebnisse der Ereignis-Einsatz-Analysen sind dabei vor dem Hintergrund der Befragungsergebnisse zur Einsatzdokumentation zu interpretieren. Den Angaben der 182 Teilnehmenden aus 10 Bundesländern nach werden zwar überwiegend ähnliche Informationen zu einem Einsatz erfasst, doch die dabei verwendeten Kategorien fallen oft unterschiedlich aus. Dies gilt insbesondere für Angaben zur Einsatzursache, die je nach verwendetem Einsatzstichwort eine genauere oder weniger exakte Eingrenzung auf Extremwetter bzw. einen bestimmten Ereignistyp (z. B. Starkregen) erlauben. Auch die Vielzahl der verwendeten Eingabesysteme sowie eine uneinheitliche Auslegung des Einsatzbegriffs erschweren die Vergleichbarkeit der Einsatzdaten, sowohl auf administrativer als auch auf Organisationsebene. Gleichwohl konnte im Projekt gezeigt werden, dass die kombinierte Analyse von Einsatz- und Niederschlagsdaten großes Potenzial bietet, um die Auswirkungen von Extremereignissen auf das Einsatzgeschehen sichtbar zu machen

und damit auch lokale Schadensschwerpunkte zu identifizieren. Nicht zuletzt das hohe Interesse, das die Befragten vieler Kommunen an der Verwendung der eigenen Einsatzdaten für das Monitoring von Einsatzhäufigkeiten und -schwerpunkten äußerten, wies auf einen Bedarf an diesen Auswertungen hin. Um auch zwischen einzelnen Kommunen einen besseren Vergleich hinsichtlich der Einsatzfähigkeit bei Extremwetter zu ermöglichen, aus den Einsatzdaten Veränderungen in der Einsatzbelastung im Lauf der Zeit feststellen und daraus einen Anpassungsbedarf ableiten zu können, wurden im Rahmen der Handlungsempfehlungen einige Ansatzpunkte zu einer möglichen Weiterentwicklung der Einsatzerfassung formuliert. Im Zentrum steht dabei die Erhöhung der Kompatibilität zwischen den erfassten Einsatzinformationen und den dabei verwendeten Dokumentationsformen und -systemen. Weitere maßgebende Anpassungsoptionen werden in der Entwicklung und Anwendung von Konzepten für vorgeplante Einsatzstrukturen und Unterstützungsmöglichkeiten jedweder Art gesehen. Der lokalen Bevölkerung kommt dabei als potenziell betroffener, gleichzeitig aber auch an der Bewältigung mitwirkender Part eine entscheidende Bedeutung zu. Die stärkere Aktivierung der Vorsorge- und Selbsthilfefähigkeit im Rahmen der Risiko- und Krisenkommunikation wurde daher ebenfalls als wichtige Maßnahme identifiziert. Neben der Unterstützung vor Ort kann insbesondere von interkommunalen Netzwerken profitiert werden, um Erfahrungen auszutauschen und von geeigneten Bewältigungs- und Anpassungsstrategien anderer Kommunen zu lernen. Dies gilt für Maßnahmen des Katastrophenschutzes ebenso wie für Maßnahmen in der Siedlungsentwicklung. Erfolg versprechend scheinen dabei vor allem solche Handlungsoptionen, die auf die zukünftige Klimaentwicklung ausgerichtet sind und dabei sowohl einem „Zuviel“ als auch einem „Zuwenig“ an Wasser gleichermaßen begegnen. Das Prinzip der „Schwammstadt“ setzt mit einer dezentralen Regenwasserbewirtschaftung durch den Wasserrückhalt in temporären Speichern und zeitgleicher Kühlwirkung an jener Stelle an. Zusammenfassend gilt: Jede Maßnahme, die geeignet ist, um eine Gefährdung von Menschen und ihrer Lebensumwelt durch Extremwetter zu verringern, entlastet am Ende auch das System Bevölkerungsschutz.



1.

Kapitel

Quelle: shutterstock/JuergenFaelchle

Einleitung

Extremwetterereignisse wie Starkniederschläge stellen sowohl für die Verantwortlichen im Katastrophenschutz als auch in der Stadt- und Raumplanung eine enorme Herausforderung dar. Für die einen bedeuten sie einen zum Teil erheblichen Einsatzaufwand „bis ans Ende der Kräfte“ (UMWELTBUNDESAMT 2019, S. 234), für die anderen die Notwendigkeit nach räumlichen Vorsorgekonzepten zur Vermeidung von Schäden an Gebäuden und öffentlicher Infrastruktur sowie gesundheitlichen Risiken für die Bevölkerung.

Klimaprojektionen deuten darauf hin, dass sich die Anzahl und die Intensität von Extremwettern durch den globalen Klimawandel in Zukunft noch weiter erhöhen könnten (RAHMSTORF UND COUMOU 2011; REKLIES-DE-ERGEBNISBERICHT 2017). Bereits für die vergangenen 3 Dekaden konnte eine signifikante Zunahme der Starkniederschläge ermittelt werden, die im Zusammenhang mit der Klimaerwärmung steht (LEHMANN et al. 2015). Umso wichtiger werden Erkenntnisse über die Entwicklung von Häufigkeit und Ausprägung extremer Wetterereignisse, insbesondere Starkregen, und die damit verbundenen Folgen für das Einsatzgeschehen und die urbanen Lebensräume in Deutschland. Die Vielzahl der in den letzten Jahren erschienenen Publikationen und Handreichungen zum Umgang mit Extremereignissen (z. B. BBK 2015, BBSR 2018, UBA 2019), aber auch die immer wieder im Zusammenhang mit aktuellen Ereignissen an die Behörden gerichteten Medienanfragen verdeutlichen darüber hinaus den Bedarf an Information und Aufklärung sowie verbesserten Grundlagen für die Politikberatung.

In den beiden bisherigen Projekten der Strategischen Behördenallianz wurde bereits der Frage nach der zu erwartenden Änderung von Extremereignissen im Zuge des Klimawandels (Projekt „Extremwert“) im Allgemeinen sowie der Frage nach der rezenten Änderung von extremen Niederschlagsereignissen im Besonderen (Projekt „Radarklimatologie“) nachgegangen. Die Auswertungen der Klimaprojektionen im Rahmen des Extremwertprojekts I zeigten u. a., dass insbesondere für die zweite Hälfte des 21. Jahrhunderts mit einer deutlichen Zunahme der Häufigkeit heute noch relativ seltener, sehr hoher Tageshöchst-

temperaturen und täglicher Niederschlagsmengen zu rechnen ist. Dabei werden die heute besonders seltenen Extremwerte vermutlich am stärksten zunehmen. Die deutschlandweiten Auswertungen des Radarklimatologie-Projekts bilden eine neue meteorologische Grundlage, um extreme Niederschlagsereignisse räumlich und zeitlich in wesentlich genauerer Auflösung ($1 \times 1 \text{ km}^2$; 1 h) als bisher möglich erfassen zu können. Damit lässt sich für den Zeitraum ab 2001 nicht nur erkennen, wo und wann genau ein Starkregenereignis stattgefunden hat, sondern perspektivisch mit einer hinreichend langen Datenreihe auch, ob und ggf. in welchen Regionen Deutschlands sich ein Trend zu mehr extremen Niederschlagsereignissen abzeichnet. Die flächendeckende Niederschlagsklimatologie RADKLIM (WINTERRATH et al. 2017, 2018) ermöglichte nun zum ersten Mal eine ereignisbezogene Analyse unter Einbeziehung der horizontalen Ausdehnung und Andauer unabhängiger Ereignisse.

Zum Projektstart existierte keine objektive Definition und Abgrenzung eines meteorologischen Extremereignisses, etwa in der Frage, wo auf der raumzeitlichen Skala ein Ereignis beginnt und wo es endet. Deutlich wird die Problematik bei der Betrachtung eines Frontendurchgangs mit mehreren konvektiven Schwerpunkten: Ist die Front als großräumiges Wetterereignis zu betrachten oder aber jede Konvektionszelle separat als Starkregenereignis? Aus diesem Grund konnte bislang noch keine objektive Aussage zur Häufigkeit von Extremereignissen getroffen werden. Diese ist aber zwingend notwendig, um Aussagen zu potenziellen Trends in Häufigkeit und Intensität von Extremereignissen formulieren zu können. Über die im Rahmen von KlamEx entwickelte objektive Ereignisdefinition, die verschiedene Parameter umfasst, kann perspektivisch eine potenzielle Änderung der Niederschlagscharakteristik zu kleinräumigeren, intensiveren Niederschlägen auch quantitativ erfasst werden.

Weiterhin war es bislang kaum möglich, Daten zu Extremwetterereignissen zu weiteren auswirkungsrelevanten Parametern in Beziehung zu setzen. Der Einsatz der hochaufgelösten, flächendeckenden Radardaten ermöglicht es nun,

den Zusammenhang zwischen meteorologischem Niederschlagsereignis und nichtmeteorologischen Informationen detailliert darzustellen und darüber die Folgen eines solchen Ereignisses besser zu verstehen.

Die Ergebnisse sind für den Bevölkerungsschutz und die Raumordnung, Regional- und Bauleitplanung von hoher Bedeutung. Beide Themen werden in der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS, DIE BUNDESREGIERUNG 2008) als Querschnittsfelder adressiert und in den Vulnerabilitätsanalysen (ADELPHI/PRC/EURAC, 2015, 2. Analyse in 2021 folgend) insbesondere im Hinblick auf ihre Möglichkeiten zur Erhöhung der Anpassungskapazität in den anderen in der DAS genannten Handlungsfeldern betrachtet. Um diesem Auftrag Folge leisten zu können, muss gewährleistet sein, dass die beiden genannten Querschnittsfelder nicht selbst von den Auswirkungen des Klimawandels in einer einschränkten Weise betroffen sind.

Dies gilt insbesondere für den Bevölkerungsschutz. Die Bewältigung von Schadenslagen aufgrund von Unwettern wird häufig durch Eigenbetroffenheit der im Katastrophenschutz eingebundenen Organisationen (Feuerwehren, Hilfsorganisationen, THW) erschwert, wenn z. B. Verkehrswege blockiert und Liegenschaften überflutet sind oder in personeller Unterbesetzung agiert werden muss. Seitens der Organisationen besteht zudem verbreitet der Eindruck, dass die Einsatzbelastung aufgrund von Unwettern in der jüngeren Vergangenheit zugenommen hat. Empirisch nachprüfbar ist dies bislang allerdings nicht. Versuche zur kombinierten räumlichen Analyse von Einsatz- und Wetterdaten waren aufgrund der Inhomogenität der erfassten Einsatzdaten auf einzelne Gebiete beschränkt (KUTSCHKER UND GLADE 2016). So werden Einsätze innerhalb und zwischen den Organisationen des Bevölkerungsschutzes heterogen erfasst, weil z. B. keine einheitlichen Einsatzstichworte für Unwettereinsätze verwendet werden oder der Einsatzbegriff unterschiedlich ausgelegt wird. Infolgedessen sind eine datengestützte Betrachtung der Einsatzbelastung und die Feststellung eventueller Veränderungen im Zuge des Klima-

wandels nicht zuverlässig möglich. Deshalb trifft etwa der Monitoringbericht (UBA 2015, UBA 2019) Aussagen über die Einsatzbelastung der im Katastrophenschutz eingebundenen Organisationen in Ermangelung einer darüber hinaus gehenden Datengrundlage ausschließlich auf Basis von Einsatzdaten des THW. Damit sind jedoch erhebliche Einschränkungen hinsichtlich der Repräsentativität hierbei getroffener Aussagen für das Gesamtsystem Bevölkerungsschutz verbunden. Über die Einsatzbelastung aufgrund extremer Wetterereignisse ist weder ein Istzustand zu bestimmen noch könnte eine Zunahme im Laufe der Zeit abgelesen und daraus ein Anpassungsbedarf abgeleitet werden. Es besteht die Gefahr, dass Bedarf und Beiträge des Bevölkerungsschutzes im Politikbereich „Anpassung an den Klimawandel“ nicht in angemessener Form darstellbar und „sichtbar“ sind. Die in KlamEx durchgeführten Erhebungen zur Einsatzerfassung geben einen wichtigen Überblick über die bestehenden Strukturen und decken Ansatzpunkte auf, um neben Fallstudien auch kombinierte statistische Analysen von Extremereignis- und Einsatzdaten durchführen zu können. Die anhand einiger Einsatzdatensätze durchgeführten Verknüpfungen mit Ereignisdaten zeigen auf, wo Möglichkeiten und Grenzen der gemeinsamen Auswertung liegen, und geben Hinweise auf die Enge des Zusammenhangs zwischen Starkregenereignissen und korrespondierendem Einsatzgeschehen. Die Untersuchung der auf diesen Zusammenhang einwirkenden meteorologischen und nichtmeteorologischen Faktoren ermöglicht es, noch gezieltere Anpassungsbedarfe und Maßnahmenvorschläge, etwa für die Einsatzplanung und Bauleitplanung, zu formulieren. Diese Planungsansätze werden durch die statistische Ereignisanalyse gestützt, durch die Starkregenereignisse und ihre potenziellen Folgen für Siedlungsräume und die im Katastrophenschutz tätigen Organisationen in Zukunft noch besser eingeordnet werden können.

Auch die räumliche Planung benötigt genauere Kenntnisse der räumlichen Verteilung sowohl beobachteter als auch prognostizierter Stark- und Extremniederschläge, um auf der Basis von Wahrscheinlichkeiten zu Vorkommen, Intensität und Andauer zusammen mit der Siedlungswasserwirt-

schaft entsprechende präventive Maßnahmen durchführen zu können. Denn bauliche Infrastruktur ist langlebig, sie muss bereits heute auf künftige Herausforderungen ausgerichtet werden. Diese Vorsorgemaßnahmen werden umso wichtiger, als durch die anhaltende Nachverdichtung (inner-)städtische Flächen zunehmend versiegelt werden. Dabei verstärkt der beobachtete und prognostizierte Klimawandel mit einer Häufung extremer Niederschläge die Risiken der durch Starkregen ausgelösten Sturzfluten und Überschwemmungen für Bewohner und bauliche Infrastruktur. Daneben steigen potenziell die Risiken für weitere, zumeist leitungsgebundene Infrastrukturen wie Wasserver- und -entsorgung, Energieversorgung und Transportinfrastrukturen (Schiene, Straße, Wasserwege).

Vor dem Hintergrund der geschilderten Problemstellungen zeigt sich ein besonderer Zugewinn in der umfassenden Analyse der Niederschlagsereignisse und ihres Wirkgeschehens – sowohl von meteorologischer als auch von nichtmeteorologischer Seite –, um hierüber das Verständnis bezüglich der Auswirkungen von Extremereignissen substanziell zu erweitern. Die Betrachtung von Ereignissen und des Zusammenspiels einzelner ausschlaggebender Faktoren kann den Zusammenhang zwischen Ereignis und Ereignisfolgen bzw. Einsatz dabei wesentlich detaillierter beleuchten, als dies bislang durch rasterbasierte Auswertungen möglich war. Die hierdurch erlangten Erkenntnisse bilden die Grundlage für die Ableitung geeigneter Mittel zur Prävention, etwa in Form von Handlungsempfehlungen, oder den Anstoß von Dialogprozessen zwischen den verantwortlichen Stellen.

1.1. Kernthemen des Projekts KlamEx

Die grundlegenden Aufgaben im Rahmen des Projekts KlamEx bestanden in der Herleitung einer durch Einsatzdaten plausibilisierten, objektiven, datenbasierten Definition extremer Niederschlagsereignisse und der Erstellung eines darauf basierenden Ereigniskatalogs. Als Datengrundlage diente die im Rahmen des Extremwertprojekts II entwickelte radarbasierte Nieder-

schlagsklimatologie RADKLIM, die seitdem am Deutschen Wetterdienst jährlich fortgeschrieben wird. Der mit einer Vielzahl meteorologischer und geografischer Attribute sowie den verfügbaren Einsatzdaten von Feuerwehren gekoppelte Ereignisdatensatz lieferte die Grundlage für umfangreiche Auswertungen.

Mittels statistischer Auswertung der Starkregenereignisse, der Analyse von Einzelereignissen sowie der Untersuchung potenzieller Zusammenhänge zu weiteren meteorologischen und nicht-meteorologischen Parametern wurden folgende Kernfragen des Projekts behandelt:

- Welche (urbanen) Regionen innerhalb Deutschlands waren in den Jahren seit 2001 von Starkregenereignissen besonders betroffen?
- Wie lässt sich der Zusammenhang zwischen extremem Niederschlagsereignis und Einsatzgeschehen qualitativ und quantitativ beschreiben?
- Welche meteorologischen und nichtmeteorologischen Wirkkomponenten beeinflussen die Eigenschaften und Auswirkungen eines Starkregenereignisses?
- Welche Maßnahmen können die Risikoversorge gegenüber Starkregen im Bevölkerungsschutz und in der Stadtentwicklung unterstützen?

Im Bevölkerungsschutz wurde dabei eine Diskussion über die derzeitige Praxis der Erfassung und ihre mögliche Weiterentwicklung im Hinblick auf die Klimaanpassung angestoßen. Mit der Analyse von Ereignishäufigkeiten wurden regionale Verbreitungsmuster und Hotspots von Stark- und Extremregenereignissen nach dem derzeitigen verfügbaren Kenntnisstand ermittelt, die eine regional angepasste Prävention durch Siedlungswasserwirtschaft und Raumentwicklung erfordern. Mit Fokus auf den urbanen Raum wurden Zusammenhänge zwischen Starkregenvorkommen und siedlungsspezifischen Parametern untersucht.

Im Hinblick auf eine potenzielle Änderung der Starkregencharakteristik durch den Klimawandel wurde die Skalierung charakteristischer Ereignis-

eigenschaften mit der Temperatur untersucht. Hierbei bietet der Ereigniskatalog spezifische Ereignisdaten, die über die Betrachtung einer reinen Skalierung der Niederschlagsintensität hinausgehen.

Darüber hinaus wurden die Grundlagen für weitere spezifische Analysen in den entsprechenden Ressorts geschaffen, die nicht alle im Rahmen der Projektlaufzeit durchgeführt werden konnten.

1.2. Überblick über nationale und internationale Aktivitäten zum Thema ereignisbezogene Starkregenanalyse

Während radarbasierte Niederschlagsklimatologien in den letzten Jahren vermehrt als Grundlage klimatologischer Untersuchungen in der Wissenschaft betrachtet wurden, sind ereignisbasierte Untersuchungen noch eher selten und oftmals auf einzelne Fallstudien beschränkt. Übersichten über klimatologische Auswertungen radarbasierter Niederschlagsmessungen finden sich in WINTERRATH et al. (2017) sowie LENGFELD et al. (2021c). Arbeiten, welche die räumliche Dimension der Starkregenereignisse berücksichtigen, umfassen die Papiere von MÜLLER UND KASPAR (2014), welche die Niederschlagsfläche in die Bestimmung des Weather Extremity Index integrieren, sowie WRIGHT et al. (2014), die reale Niederschlagsereignisse im Hinblick auf ihren hydrologischen Impact statistisch einordnen. THORND AHL et al. (2014) entwickelten einen Extremereigniskatalog für die Region Süd-Wisconsin, Nord-Illinois und Lake Michigan auf der Basis radarbasierter Niederschlagsmessungen für die Periode 1996 bis 2011. ARMON et al. (2020) identifizierten und charakterisierten 41 Starkniederschlagsereignisse im östlichen Mittelmeerraum basierend auf 24 Jahren Radardaten. Im Rahmen des Projekts URBAS (EINFALT et al. 2009) wurde ein umfassender Ereigniskatalog auf Basis von Niederschlagsmessungen und Versicherungsdaten erstellt. Dieser umfasst Starkregen- und Sturzflutereignisse, die zwischen dem Ende der 1970er- und dem Beginn der 2000er-Jahre zu Schäden in Deutschland geführt haben. Der Deutsche Wetterdienst katalogisiert Extrem-

ereignisse, die aufgrund des Impakts und der medialen Berichterstattung außergewöhnlich waren.

All diese Ansätze haben gemeinsam, dass sie selektiv bedeutende Starkregenereignisse zugrunde legen und analysieren. Demgegenüber war das Ziel des Projekts KlamEx, eine objektive Definition zur automatischen Detektion und Charakterisierung von Extremereignissen über Dauerstufen zwischen einer und 72 Stunden zu entwickeln, um alle in den Daten existenten Starkregenereignisse zu katalogisieren und somit eine Grundlage für statistische Auswertungen zu legen.

Einen objektiven Ansatz zur Ereignisdetektion verfolgen auch PURR et al. (2019), die zum Zweck einer Modellevaluation extreme Niederschlagsobjekte in den RADKLIM-Daten sowie im Klimamodell CCLM detektieren und unter Anwendung eines Zellverfolgungsalgorithmus verfolgen und analysieren. Die umfangreichen Analysen umfassen nicht nur ereignisspezifische Statistiken zur räumlich-zeitlichen Verteilung und zu Lebenszyklen, sondern auch Zusammenhänge zwischen den detektierten Ereignisparametern sowie Temperatur- und Feuchtedaten für Perzentile von 90, 95 und 99 %. Die Ergebnisse zeigen positive Zusammenhänge für die mittlere Niederschlagsintensität, die Gesamtniederschlagssumme, die Lebensdauer einer konvektiven Zelle und die Ereignisfläche. Dabei übersteigt die Zunahme des ereignisspezifischen Gesamtniederschlags den Wert von 7 % pro Kelvin Temperaturzunahme entsprechend der Clausius-Clapeyron-Gleichung im Temperaturbereich zwischen 15 °C und 23 °C deutlich. Die Stagnation bei höheren Temperaturen führen sie auf ein beginnendes Feuchtedefizit zurück. Eine Kopplung der Ereignisdaten aus RADKLIM mit Schadensdaten des GDV erfolgte im Starkregen-Projekt des DWD (GDV 2019; LENGFELD 2020). Das Projekt lieferte darüber hinaus die Grundlage für den im Rahmen von KlamEx weiterentwickelten Ereigniskatalog.

1.3. Einordnung in Forschungsaktivitäten zur Ermittlung der Starkregengefährdung im urbanen Raum

Städte sind für Auswirkungen von Wetterextremen wie Starkregen besonders anfällig, da diese dort zu immensen materiellen Schäden an Infrastruktur und Gebäuden führen und auch Menschen gefährden können. Dies trifft umso mehr zu, da die Bevölkerung in Stadtregionen stetig weiter zunimmt und zeitgleich der Anteil freier, unversiegelter Flächen zurückgeht (vgl. DOSCH & FISCHER 2019). So wuchsen die 82 Großstädte Deutschlands (2019) zwischen 2005 und 2019 um 1.916.647 Einwohner bzw. 7,7 %. Eine derart verdichtete Stadt steht darüber hinaus dem Klimawandel gegenüber, der das Auftreten von Extremwetterereignissen noch wahrscheinlicher werden lässt. Schäden, die in urbanen Gebieten durch Starkregen und Sturzfluten aufgetreten sind, sowie auslösende Faktoren wurden nach vergangenen Ereignissen durch die betroffenen Kommunen oder im Rahmen ergänzender Forschungsarbeiten zum Teil umfänglich dokumentiert (z. B. VOGEL et al. 2017). Nicht ohne Grund hat auch die Entwicklung von Strategien zum Umgang mit Starkregen im urbanen Raum nochmals an Bedeutung gewonnen, sodass neben kommunalen Anpassungsstrategien wie der Klimaanpassungsstrategie (KLAS) Bremen (KOCH et al. 2015) auch eine Vielzahl allgemeiner Empfehlungen zum Umgang mit Starkregen veröffentlicht wurde (z. B. IBH RHEINLAND-PFALZ & WBW 2013, BBSR 2015, BBK 2015, LAWA 2018, UBA 2019b, HOY et al. 2020).

Erfahrungen aus unterschiedlichen Studien der vergangenen Jahre haben dabei gezeigt, dass es einer hohen Qualität von Modellierungsergebnissen und detaillierter Daten bedarf, um Glaubwürdigkeit und öffentliche Akzeptanz hinsichtlich der Ergebnisse zu erlangen (FRITSCH et al. 2016). Starkregengefahrenkarten können diesen Anforderungen auf lokaler bis regionaler Ebene Rechnung tragen, werden aufgrund des damit verbundenen finanziellen Aufwands jedoch bislang erst von weniger als 10 % der deutschen Kommunen vorgehalten (FELDMANN 2019). Um die Entwicklung eines kommunalen

Starkregenrisikomanagements dennoch auf einer validen Grundlage anstoßen zu können, gibt es ein nachvollziehbares Interesse daran, besonders betroffene Schwerpunkte – sogenannte „Hotspots“ – zu identifizieren, die Auskunft über ausgewiesene Gefahrenzonen im Vergleich zu weniger häufig betroffenen Gebieten geben könnten. Während die hochaufgelösten Radarniederschlagsdaten eine solche Betrachtung für den Zeitraum ab 2001 von rein meteorologischer Seite bereits ermöglichten, bedarf es einer Verknüpfung mit weiteren Daten, um detailliertere Aussagen über die Verteilung von Hotspots treffen zu können. Eine landesweite Ermittlung solcher Starkregen-Schwerpunkte wurde erstmalig für Hessen im Rahmen des KLIMPRAX-Projekts vorgenommen. Eines der erzielten Ergebnisse dieses Projekts ist eine Starkregen-Hinweiskarte, die auf 2 entwickelten Indizes basiert. Neben den Radarniederschlagsdaten des DWD beinhalten diese auch Daten zur Versiegelung, Bevölkerungsdichte, Topografie, Erosionsgefährdung und zu potenziell betroffenen Kritischen Infrastrukturen (KREKLOW et al. 2019). Trotz der relativ groben Auflösung von 1 km² erlaubt die Karte „eine erste grobe Einschätzung der Starkregengefährdung einer Kommune oder Region“ und kann somit „dazu beitragen, die Grundlagen für ein Starkregen-Management für das Bundesland Hessen zu schaffen“ (ebd., S. 96). Ein weiterer Ansatz zur Untersuchung der Starkregengefährdung wurde durch den Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (GDV) gemeinsam mit dem Deutschen Wetterdienst (DWD) entwickelt, indem für das gesamte Bundesgebiet Starkregenereignisdaten zu Daten über versicherte Starkregenschäden in Beziehung gesetzt wurden. Demnach verursachten Niederschlagsereignisse kürzerer Dauerstufen gegenüber länger anhaltenden Ereignissen etwa dreimal mehr Schäden (GDV & DWD 2020). Auf Kreisebene wurden zudem diejenigen Gebiete identifiziert, die innerhalb des betrachteten Zeitraums (2002-2018) durch eine erhöhte Schadenshäufigkeit gekennzeichnet waren. Gleichzeitig wurde aber auch seinerzeit nochmals betont, „dass gerade diese schadenträchtigen heftigen Starkregenereignisse in ganz Deutschland mit etwa gleicher Wahrscheinlichkeit auftreten“ (ebd., S. 11).

Um auch unabhängig von konkreten räumlichen Gebieten Aussagen über die Gefährdung durch Starkregen treffen zu können, wurden im Rahmen des KlamEx-Projekts Zusammenhangsanalysen zwischen starkregenbedingten Einsatzzahlen und Geoparametern durchgeführt. Die Ergebnisse geben trotz der geringen Anzahl ausgewerteter Einsatzdatensätze erste Hinweise darauf, welche Siedlungseigenschaften einen erhöhten Impakt begünstigen. Im Rahmen des Projekts IVS-Sturzfluten des DWD werden diese Untersuchungen zur potenziellen Starkregengefährdung durch Extremereignisse weitergeführt und mit dem Ziel der Erstellung von Starkregenerisikokarten um Daten zur Vulnerabilität ergänzt.

1.4. Einordnung in Forschungsaktivitäten im Bevölkerungsschutz

Der Klimawandel mit seiner erwarteten Zunahme in der Häufigkeit und Intensität von Extremwetterereignissen ist ein Thema, das die Organisationen im Bevölkerungsschutz – darunter insbesondere die Feuerwehren – seit einigen Jahren verstärkt beschäftigt. Zu sehen ist dies an entsprechenden Beiträgen in Fachzeitschriften (z. B. NIKOLA 2019, GÖWECKE & KNAUER 2020, SANDER 2020) oder auch im Aufgreifen der Thematik durch verschiedenste Gremien (z. B. DKKV 2016). Darüber hinaus werden vermehrt Forschungsprojekte zu Extremwetter initiiert, die unterschiedliche Aufgaben des Bevölkerungsschutzes tangieren (vgl. NIKOGOSIAN & WINTERRATH 2019). Fragestellungen in diesem Zusammenhang befassen sich beispielsweise mit der Resilienz von im Bevölkerungsschutz tätigen Organisationen (Projekt REBEKA, vgl. JUH 2016), der strukturierten Einbindung von Spontanhelfenden in die Ereignisbewältigung (Projekt VEREINT, vgl. TU DRESDEN 2021) oder mit einer verbesserten Nutzung von Wetterwarnungen (Projekt WEXICOM, vgl. KOX & GEROLD 2019). Wenngleich sich die Mehrzahl der Projekte dabei nicht explizit mit dem Thema Starkregen befasst, können ihre Ergebnisse durchaus auch in diesem Kontext angewendet werden. Eine erste genauere Untersuchung zu den Auswirkungen von Starkregenerereignissen in besiedelten Gebieten wurde in den

Jahren 2005 bis 2008 durch das Projekt URBAS vorgenommen. In einer über 500 Ereignisse und deren Schadensfolgen umfassenden Datenbank wurden z. T. auch die Einsatzzahlen zu diesen Ereignissen dokumentiert, und es wird darauf hingewiesen, dass erst „eine genaue Analyse der Einsätze und möglicherweise aufgetretener Probleme [...] die Chance [bietet], die Einsätze künftig zu verbessern“ (CASTRO et al. 2008).

Die Frage nach einem möglichen Zusammenhang zwischen einer Zunahme der Ereignisse und einer Zunahme der Einsatzhäufigkeit steht allerdings noch unbeantwortet im Raum und wird lediglich durch Vermutungen gestützt: „Es ist zu erwarten, dass die Einsatzhäufigkeit infolge extremer Klimabedingungen weiter erheblich steigen wird.“, schreiben etwa GÖWECKE & KNAUER (2020). Diese Aussage ist genau genommen so nicht korrekt, da bis dato noch gar kein Anstieg in der Einsatzhäufigkeit nachgewiesen werden konnte. Auch wenn seitens vieler Organisationen dieser subjektive Eindruck besteht, konnte er bislang nicht anhand von Einsatzdaten belegt werden. Dies liegt vor allem an der Schwierigkeit, Einsatzdaten mit meteorologischen Daten zu verknüpfen. Durch KUTSCHKER (2018) wurde hierzu ein erster Ansatz entwickelt und für das Rhein-Main-Gebiet in der Praxis erprobt. Die zur Verfügung stehenden Einsatzdaten wurden dafür anhand einer Zählroutine händisch nach der Einsatzursache „Starkregen“ ausgefiltert, da ein näher spezifiziertes Einsatzstichwort nicht zur Verfügung stand (in diesem Fall stattdessen: „Hilfeleistung klein – H-1“). Für die Niederschlagsdaten wurde auf den RADKLIM-Datensatz des DWD zurückgegriffen, wobei nur die Ereignisse betrachtet wurden, die eine größere Anzahl an Feuerwehreinsetzungen zur Folge hatten. Die gemeinsame Auswertung von Einsatz- und Niederschlagsdaten erfolgte grafisch für das gesamte Untersuchungsgebiet mithilfe eines Geografischen Informationssystems (GIS). Ein quantitativer Zusammenhang wurde nicht untersucht. Die Auswertung der Einsatzzahlen nach Landkreisen und kreisfreien Städten konnte jedoch zeigen, „dass sich die Einsatzzahlen [...] nicht proportional zu den Niederschlagsmengen verhalten und Großstädte nicht zwangsläufig auch höhere Einsatzzahlen haben“ (ebd., S. 160).

Vielmehr müssten bei der Beurteilung auch örtliche Einflussfaktoren berücksichtigt werden. Insgesamt sei „die Auswertung von Einsatzdaten zur Optimierung der Einsatzplanung für Flächenlagen durchaus ein gutes Mittel“ und bedürfe „lediglich einiger kleiner Verbesserungen bezüglich einer einheitlichen Datenstruktur und der Optimierung der statistischen Auswertbarkeit“ (ebd., S. 161).

Eine quantitative Zusammenhangsanalyse zwischen (Stark-)Niederschlägen und der Anzahl von Einsätzen des Katastrophenschutzes ist aus dem deutschen Raum nicht bekannt, wurde aber seitens des Schweizer Bundesamts für Bevölkerungsschutz für die Stadt Zürich durchgeführt (BABS 2019). Der Studie zufolge ist ein Zusammenhang besonders für lokal begrenzte Niederschläge hoher Intensität nachweisbar, die eine größere Zahl von Einsätzen zur Folge haben. Ereignisse mit wenigen nachfolgenden Einsätzen wiesen dagegen oft kein klares Niederschlagssignal auf. Des Weiteren wurden Niederschlagsschwellenwerte ermittelt, bei deren Überschreitung mit einer relevanten Häufung von Einsätzen zu rechnen ist. Basierend auf diesem Zusammenhang konnte anhand von Klimaszenarien eine Abschätzung für eine mögliche Veränderung der Einsatzhäufigkeit durch den Klimawandel getroffen werden. Demnach sei bis 2040 nur eine geringe Veränderung in der Häufigkeit von wasserbezogenen Einsätzen in Zürich zu erwarten. Stärker als durch den Klimawandel werde die Zahl der Einsätze von der Bevölkerungs- und Siedlungsentwicklung beeinflusst, sodass trotz eines geringeren klimatischen Einflusses mit einer „deutlichen Zunahme des Schadenspotenzials in gefährdeten Zonen“ zu rechnen sei (ebd., S. 6). Von den Bearbeitenden der Studie wird angemerkt, dass diese Detailanalysen erst durch die hohe Datengüte ermöglicht worden seien: „Die Datenlage bei den Einsatzdaten von SRZ (Schutz & Rettung Zürich) ist wahrscheinlich schweizweit einmalig, sowohl von der Anzahl der Daten her als auch bezüglich der Informationen zu den Einsätzen. Von daher sind die Voraussetzungen gegeben, um bestmögliche Resultate herzuleiten“ (ebd., S. 42).

Aus den beiden letztgenannten Untersuchungen wird deutlich, dass die Qualität der Einsatzdaten einen entscheidenden Einfluss auf deren Auswertungsmöglichkeiten im Zusammenhang mit Extremwetterereignissen hat. Im Rahmen des Projekts ist es daher von großer Bedeutung, zunächst einen Überblick über die überregional bzw. landes- und bundesweit angewendeten Methoden zur Dokumentation von Einsätzen zu erlangen, um Aussagen formulieren zu können, die für einen größeren Raum von Gültigkeit sind.

1.5. Rechtliche Zuständigkeit des Katastrophenschutzes in Deutschland bei der Vor- und Nachsorge von Starkregenereignissen

Um zu verstehen, weshalb Einsätze so erfasst werden, wie sie erfasst werden, hilft ein Blick auf die Organisationsstruktur des Bevölkerungsschutzes in Deutschland. Dieser ist auf 3 Verwaltungsebenen organisiert: den staatlichen Ebenen des Bundes, der Länder sowie der Kommunen in Form von Gemeinden, kreisfreien Städten und Landkreisen. Das daraus erwachsende integrierte Hilfeleistungssystem lässt sich bildlich in Form einer Pyramide darstellen, die neben den verschiedenen Ebenen auch die darin wirkenden Akteure benennt (vgl. Abbildung 1).

Mit dem Gesetz über den Zivilschutz und die Katastrophenhilfe des Bundes (ZSKG) setzt der **Bund** auf der obersten staatlichen Ebene den Rahmen für den Zivilschutz und die Unterstützung der Länder im Katastrophenfall. Auf der zweiten Verwaltungsebene tragen die Länder die gesetzliche Verantwortung für die Aufgaben der nichtpolizeilichen Gefahrenabwehr, darunter auch den Katastrophenschutz. Dazu haben alle 16 **Länder** jeweils eigene Gesetze zur Regelung des Brandschutzes, Rettungsdienstes, Katastrophenschutzes und der technischen/allgemeinen Hilfe erlassen, dies teils kombiniert, teils in Form separater Gesetze. In der Regel werden diese Gesetze durch weitere Verordnungen und Verwaltungsvorschriften, bspw. zur Feuerwehr- und Leitstellenorganisation oder zur Alarmierungsplanung, ergänzt. Auch wenn die Gesetze von den

Ländern jeweils in eigener Zuständigkeit erlassen werden, lassen sie sich trotz aller regionalspezifischen Unterschiede in ihren grundlegenden Inhalten und Regelungen miteinander vergleichen (VOSSCHMIDT 2016, GEIER 2017). So sind die **Kommunen** für die alltägliche Gefahrenabwehr organisatorisch verantwortlich, darunter die Gemeinden für den Brandschutz und die Allgemeine Hilfe sowie die Landkreise und kreisfreien Städte

für den Rettungsdienst und Katastrophenschutz. Die operative Durchführung dieser Aufgaben wird durch die gemeindlichen öffentlichen Feuerwehren, die privaten Hilfsorganisationen und – ergänzend auf dem Weg der Amtshilfe – die Kräfte des bundeseigenen Technischen Hilfswerks (THW) wahrgenommen. All diese Einsatzkräfte sind in Deutschland überwiegend ehrenamtlich tätig (nach Stand 2017 rund 1,7 Mio., vgl. GEIER 2017).

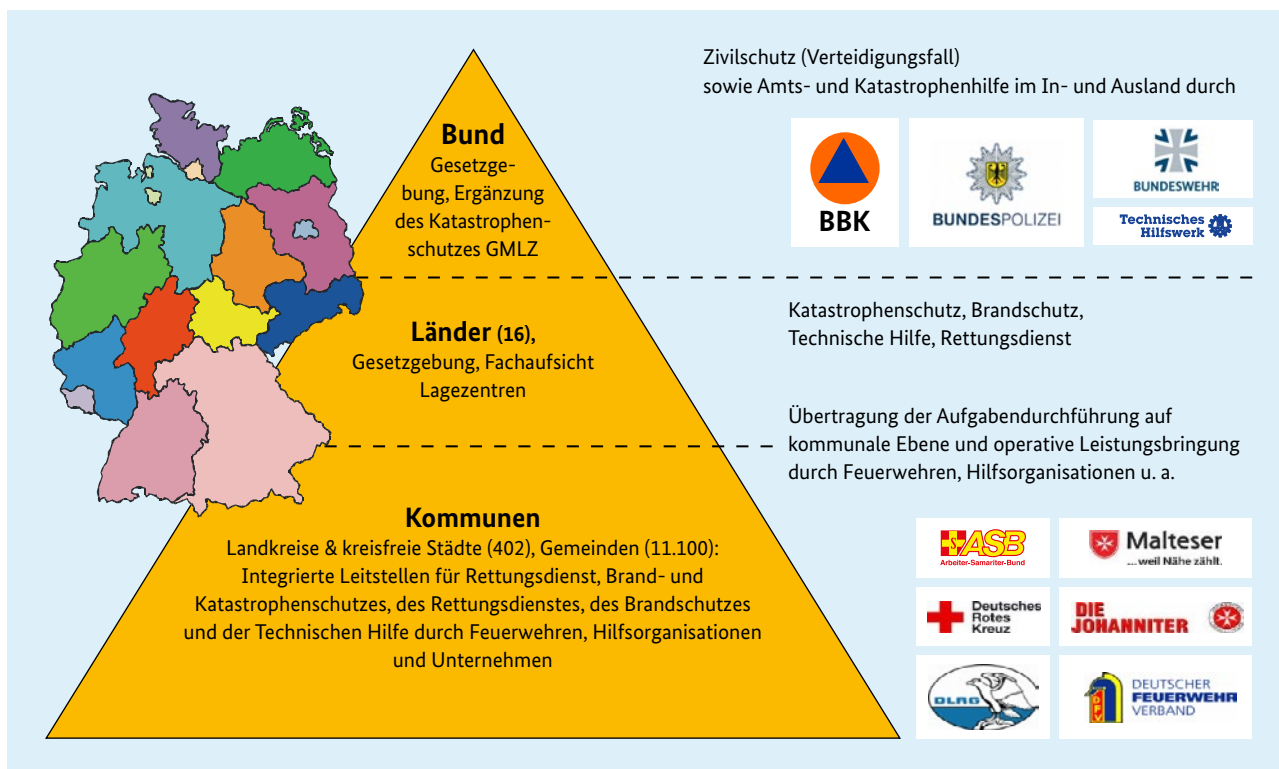


Abb. 1: Die Bevölkerungsschutz-Pyramide in Deutschland (Quelle: BBK; Abbildung in GEIER 2017, S. 98).

Grundsätzlich ist es die Aufgabe der **Gemeinde**, den örtlichen Verhältnissen entsprechend leistungsfähige Feuerwehren zu unterhalten, wobei es in ihrem Ermessen liegt, was genau eine „leistungsfähige Feuerwehr“ leisten können und wie sie gestaltet und ausgestattet sein muss. Dazu sind jedoch eine förmliche Brandschutzbedarfsplanung und die Erstellung von Einsatzplänen vorgeschrieben, die prinzipiell auch die Planung von Einsätzen nach Naturereignissen beinhalten. Darüber hinaus regeln sogenannte Alarm- und Ausrückeordnungen (AAO), welche Einsatzmittel (Fahrzeuge und Besatzung) bei welchem Ein-

satzstichwort und ggf. einer bestimmten Alarmstufe zu entsenden sind (MAURER 2005). Auch die Befugnisse einer Leitstelle gegenüber der jeweiligen Gemeindefeuerwehr werden durch die Gemeinde in der AAO festgelegt (HOMRIGHAUSEN 2015). Die Leitstellen werden dabei grundsätzlich durch die **Landkreise und kreisfreien Städte (kurz: Kreise)** als untere Katastrophenschutzbehörden betrieben. Sie werden als integrierte Leitstellen bezeichnet, wenn sie sowohl den Rettungsdienst als auch den Brand- und Katastrophenschutz abdecken. Den Kreisen kommt darüber hinaus die Aufgabe zu, die Städte und

Gemeinden bei Bedarf mit zusätzlichen Einheiten und Gerätschaften zu unterstützen (z. B. Spezialgeräte oder Fahrzeuge) und eine Leitungsorganisation für den Katastrophenschutz in Form von adäquat ausgebildeten Krisenstäben (auf Verwaltungsebene) und Einsatzleitungen (auf der operativ-taktischen Ebene) vorzuhalten. Dazu müssen sie im Vorfeld Pläne für die Katastrophenabwehr erstellen, die auf die Festlegung organisatorischer und materieller Ressourcen abzielen. Auch die Warnung der Bevölkerung ist – in Kooperation mit den kreisangehörigen Gemeinden – Aufgabe der Kreise (RECHENBACH 2017).

Die Vorbereitung auf und die Bewältigung von Starkregenereignissen durch den Katastrophenschutz stützt sich demnach auf eine Vielzahl von Regelungen und Akteuren, die auf unterschiedlichen Verwaltungsebenen angesiedelt, in der Regel innerhalb eines Landes dennoch eng verzahnt und auf hohem Niveau funktionsfähig sind. Hinsichtlich der Dokumentation der geleisteten Einsatztätigkeit sind die gesetzlichen Regelungen noch weniger dezidiert. Dabei wurde bereits um die Jahrtausendwende basierend auf Studien der 1960er, 1970er und 1990er Jahre von einigen Mitgliedern der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V. (vfdB) ein Vorstoß zu einer „bundeseinheitlichen Brand- und Feuerwehrstatistik“ unternommen. Im Rahmen eines Pilotprojekts wurde in Anlehnung an bestehende zentralstaatliche Systeme anderer Staaten ein elektronisch gestütztes Auswerte- und Analyse-System (STRES bzw. InterSTRES) entwickelt, mit den Feuerwehrverbänden diskutiert und die Basiskomponente bei 10 Feuerwehren in 8 Bundesländern getestet (WAGNER 2002). Damit wurde das Ziel verfolgt, „das System der nichtpolizeilichen Gefahrenabwehr [...] aufgrund statistischer Aussagen zu optimieren“ und damit den Ressourceneinsatz effizienter zu gestalten. Ausdrücklich wurde auch betont, dass dem „Anwender vor Ort“ damit die Möglichkeit gegeben werden solle, eigene bedarfsgerechte Analysen durchzuführen. Darüber hinaus geschah die Entwicklung des Systems im Hinblick auf eine angestrebte „Zusammenführung der lokalen Feuerwehrstatistik über die regionale und nationale Ebene bis hin zur internationalen Statistik“,

um auf den unterschiedlichen Ebenen eine Vergleichbarkeit zu erzielen (ebd.) Damit sollte unter anderem eine Konsistenz mit internationalen Bestrebungen zu einer einheitlichen Feuerwehrstatistik, so wie sie auch der Weltfeuerwehrverband (CTIF) verfolgt, erzielt werden. Nach einigen Jahren der Testanwendung konnte die Weiterentwicklung des Systems aufgrund ausbleibender Finanzierungsmöglichkeiten und Vorbehalten auf Ebene der Amtsleitungen jedoch nicht mehr fortgeführt werden, sodass es heute nach Kenntnis von WAGNER (informelle Kommunikation) nur noch in einer größeren Kommune für die eigene Bedarfsermittlung genutzt wird.

Ungeachtet des hierbei entwickelten Ansatzes wird aktuell nicht von einem bundesweit vergleichbaren System Gebrauch gemacht. Vergleichbare Vorgaben zur Erfassung von Feuerwehreinsätzen liegen kaum vor. So wird die Einsatzdokumentation in den Gesetzen und Vorschriften auf Landesebene nur in Ausnahmefällen thematisiert (z. B. ThürBrandStatVO). Die Art und Weise der Einsatzerfassung und der dafür verwendeten Systeme unterliegt demnach in den meisten Ländern dem Ermessen der Kommunen. Durch eine Befragung von Kommunen konnten im Rahmen von KlamEx nähere Informationen darüber gewonnen werden, wie sich die unterschiedlichen Regelungen auf die Einsatzdokumentation auswirken. Welche Analysen zur Untersuchung des qualitativen und quantitativen Zusammenhangs zwischen Starkniederschlagsereignissen und Einsätzen im Einzelnen möglich sind, war demnach erst in Abhängigkeit der Einsatzdatenlage zu beantworten. Der Untersuchungsansatz hinsichtlich der Verknüpfung von Ereignis- und Einsatzdaten kann demnach im Wesentlichen als explorativ bezeichnet werden.



2.

Kapitel

Quelle: shutterstock/JoChambers

Extremniederschlag im Klimawandel

Niederschlag tritt zeitlich und räumlich begrenzt auf und besitzt starke Intensitätsgradienten. Diese Eigenschaften machen es schwierig, Niederschlag so zu messen und zu modellieren, dass robuste Aussagen zu potenziellen Trends im Rahmen des Klimawandels möglich sind. Niederschlagsmessstationen liefern zwar lange Zeitreihen qualitativ hochwertiger quantitativer Messungen. Allerdings können Niederschlagsmesser ausschließlich Punktwerte messen; lokale Extremereignisse werden hierdurch oftmals nicht erfasst (LENGFELD et al. 2020), sodass die Repräsentativität der Punktmessungen für Starkregen eingeschränkt ist. Auch können keine Informationen zur räumlichen Ausdehnung eines Niederschlagsereignisses geliefert werden. Bei allen Betrachtungen potenzieller Trends muss ebenso bedacht werden, dass sich die Repräsentativität eines Netzes aus Punktmessungen mit der Änderung der Niederschlagscharakteristik selbst verändert. Tendaussagen auf Basis von Punktmessungen sind daher für den Ort der Messung gültig, erlauben aber nur eingeschränkt Rückschlüsse auf die Entwicklung des deutschlandweiten Niederschlagsverhaltens. Dies gilt insbesondere für Starkniederschläge kurzer Andauern, die kleinräumig auftreten und oft durch das Messraster fallen (WINTERRATH et al. 2017, LENGFELD et al. 2020). Im Gegensatz dazu liefern Radarmessungen die notwendigen flächendeckenden Informationen. Einschränkend muss zwar gesagt werden, dass die quantitative Bestimmung des Niederschlags im Falle lokaler Extremereignisse eine Herausforderung darstellt. Nichtsdestotrotz liefern nur Radardaten eine Klimatologie der Ereignischarakteristiken, z. B. der räumlichen Ausdehnung. Allerdings sind die Zeitreihen der verfügbaren Radarklimadaten mit 19 Jahren zum Zeitpunkt der Projektbearbeitung noch zu kurz, um bereits jetzt belastbare Trends zu ermitteln.

Um trotzdem Aussagen zu potenziellen Trends treffen zu können, kann man sich des Zusammenhangs zwischen Temperatur und Niederschlagscharakteristik bedienen. Im Gegensatz zum Niederschlag weist die Temperatur in der Regel zeitlich und räumlich kleinere Gradienten auf, sodass Punktmessungen als repräsentativ angesehen werden können und die aktuelle

Auflösung von Klimaprojektionen belastbare Aussagen zu Trends ermöglicht.

Im vorliegenden Kapitel wird in Kürze der aktuelle Wissensstand zum Thema Niederschlag im Klimawandel, insbesondere Extremniederschlag, basierend auf Beobachtungen und Klimaprojektionen dargelegt. Detaillierte Informationen können dem Nationalen Klimareport des DWD entnommen werden. Die Aussagen in den Abschnitten 2.1 und 2.2 sind dem Nationalen Klimareport 2020 (DWD, 2020) entnommen und werden zur Wahrung der Korrektheit größtenteils im Wortlaut übernommen. Auf die Kennzeichnung aller Textabschnitte als Zitate wird dabei aus Gründen der Lesbarkeit verzichtet. Dabei werden zum einen der Parameter Niederschlag direkt, aber auch die Temperatur betrachtet, die als Proxy für eine potenzielle Entwicklung extremer Niederschläge herangezogen werden kann. Wissenschaftlicher Hintergrund hierfür ist der Clausius-Clapeyron-Effekt, auf den in Abschnitt 2.3 näher eingegangen wird. Abschließend werden der Stadtklimaeffekt (Abschnitt 2.4) sowie theoretische Überlegungen zur Persistenz von Wetterlagen (Abschnitt 2.5) erläutert.

Im Folgenden werden Mittelwerte des im Bericht analysierten Klimaprojektionsensembles (Ergebnisse mehrerer Klimamodellläufe) für 2 Szenarien präsentiert. „Das Klimaschutz-Szenario (RCP2.6) basiert auf Annahmen, die der 2-Grad-Obergrenze entsprechen. Ziel ist eine Welt, in der im Jahr 2100 die globale Erwärmung nicht mehr als 2 °C im Vergleich zum Jahr 1860 beträgt. Dafür wird ein Szenarienverlauf angenommen, der mit einer sehr starken und sehr schnellen Reduktion der Emission von Treibhausgasen gegenüber dem heutigen Zustand verbunden ist. Der Höchstwert des Strahlungsantriebes wird vor dem Jahr 2050 (3,0 W/m²) erreicht. Von da an sinkt er kontinuierlich auf den Wert 2,6 W/m² im Jahr 2100. [...] Das Weiterwiebisher-Szenario (RCP8.5) beschreibt eine Welt, in der die Energieversorgung im Wesentlichen auf der Verbrennung fossiler Kohlenstoffvorräte beruht. Der Ausstoß von Treibhausgasen wird sich gegenüber heute mit einem stetigen Anstieg des Strahlungsantriebes bis hin zum Jahr 2100 erhöhen.“ (DWD, 2020).

2.1. Niederschlagstrends

2.1.1. Beobachtung

Mittelwerte

Niederschlag ist eine in Raum und Zeit sehr variable Größe. Unter teils starken Schwankungen von Jahr zu Jahr und von Jahrzehnt zu Jahrzehnt nahm die deutschlandweite jährliche Niederschlagshöhe seit 1881 um 66 mm und 8 % relativ zur Referenzperiode 1961 bis 1990 zu. Dabei gibt es deutliche jahreszeitliche Unterschiede: Von 1881 bis heute hat sich der sommerliche Niederschlag so gut wie nicht verändert. In den Übergangsjahreszeiten Frühling und Herbst zeichnet sich im gleichen Zeitraum eine Niederschlagszunahme ab, die im Frühling deutlicher ausgeprägt ist als im Herbst. Die Winterniederschläge (Dezember, Januar, Februar) haben seit dem Winter 1881/1882 bis heute um 48 mm bzw. 26 % relativ zu 1961 bis 1990 zugenommen. Damit lässt sich die Zunahme der mittleren Jahresniederschlagshöhe zum größten Teil durch die Zunahme der Winterniederschläge erklären.

Extremwerte

Zur Beschreibung potenzieller Trends in den extremen Niederschlägen werden sogenannte Kenntage (Tage mit besonderen Eigenschaften, z. B. Schwellenwertüberschreitungen des Tagesniederschlags) herangezogen. Basierend auf Stationsmessungen lassen sich aktuell keine signifikanten Änderungen der Anzahl der Tage mit mehr als 10 mm sowie 20 mm Niederschlag seit 1951 bestimmen. Ebenso sind derzeit noch keine statistisch signifikanten Trends bezüglich einer potenziellen Änderung von Trockenperioden (mindestens 10 aufeinanderfolgende Tage ohne Niederschlag) zu detektieren. Die Schwierigkeit bei der Bestimmung der Trends extremer Niederschläge liegt in der Seltenheit der Ereignisse und der hohen räumlichen und zeitlichen Heterogenität des Niederschlags auf allen Zeitskalen, die sich u. a. in einer starken Variabilität der Einzeljahre ausdrückt.

Analysen der RADKLIM-Daten bestätigen die eingeschränkte Repräsentativität der stationsgebundenen Niederschlagsdaten im Hinblick

auf Extremereignisse. Dieses Problem verschärft sich unter der Annahme einer sich ändernden Niederschlagscharakteristik und der damit einhergehenden Änderung der Repräsentativität des Stationsnetzes. Tendaussagen auf der Basis von Radardaten sind derzeit aufgrund der noch kurzen Zeitreihen jedoch nicht möglich. Die Arbeiten zur klimatologischen Aufbereitung und Analyse der Radardaten legen aber bereits jetzt den Grundstein für eine extremereignisorientierte Trendanalyse in den nächsten Jahrzehnten.

2.1.2. Klimaprojektionen

Mittelwerte

Eine deutliche Änderung der mittleren Jahressumme des Niederschlags im kurzfristigen Planungshorizont (2021–2050) ist für Deutschland nicht zu erwarten (sehr hohe Übereinstimmung der Modelle). Berechnet wird eine Zunahme des mittleren Jahresniederschlags um 4 % (mittlere Übereinstimmung). Der Unterschied zwischen den Szenarien ist gering. Die Bandbreite der Ergebnisse liegt zwischen –5 % und +13 % Änderung. Für den langfristigen Planungshorizont (2071–2100) ist für Deutschland mit einer Zunahme des Jahresniederschlags um +6 % zu rechnen (mittlere Übereinstimmung). Die Änderung wird in allen Teilen des Bundesgebietes in etwa gleich stark ausgeprägt sein. Für beide Planungshorizonte werden für die Wintermonate Zunahmen der Niederschlagsmenge simuliert. Für den Sommer reicht die Spanne von keiner Änderung bis hin zu Abnahmen im langfristigen Planungshorizont.

Extremwerte

Bezüglich der Änderung der Anzahl der Tage mit Niederschlag von mindestens 10 mm pro Tag ist für alle Regionen sowohl für den kurzfristigen Planungshorizont als auch für den langfristigen Planungshorizont mit einer Zunahme zu rechnen. Allein in der Alpenregion projizieren manche Modelle eine Abnahme der Zahl dieser Tage. Ein weniger ausgeprägter Anstieg wird für die Tage mit Niederschlag von 20 mm und mehr projiziert. Jedoch ist bei Starkniederschlägen die Spannbreite innerhalb des Ensembles teilweise sehr groß, sodass die Resultate nur wenig belastbar sind.

2.2. Temperaturtrends

2.2.1. Beobachtung

Mittelwerte

Von 1881 bis 2019 ist das Jahresmittel der Lufttemperatur für Deutschland um 1,6 °C angestiegen. 2018 wurde das bisher wärmste Jahr seit 1881 in Deutschland beobachtet. 11 der 17 wärmsten Jahre liegen im 21. Jahrhundert.

Extremwerte

Eine Einschätzung der Entwicklung extremer Temperaturen geben wiederum Kenntage. Die Anzahl heißer Tage (Tagesmaximum der Lufttemperatur ≥ 30 °C) ist, über ganz Deutschland gemittelt, seit den 1950er-Jahren von etwa 3 Tagen im Jahr auf derzeit durchschnittlich 9 Tage im Jahr angestiegen. Die mittlere Anzahl der Eistage (Tagesmaximum der Lufttemperatur < 0 °C) hat im gleichen Zeitraum von 28 Tagen auf 19 Tage abgenommen. Darüber hinaus wurden Episoden aufeinanderfolgender Tage mit hohen Temperaturen (Hitzewellen) verstärkt in den letzten Jahrzehnten beobachtet.

2.2.2. Klimaprojektionen

Mittelwerte

Die Klimaänderung zwischen dem frühindustriellen Zeitraum 1881 bis 1910 und dem aktuellen klimatologischen Bezugszeitraum 1971 bis 2000 beträgt 0,8 °C. Ein weiterer Anstieg der Temperatur in Deutschland ist zu erwarten (sehr hohe Übereinstimmung). Für den kurzfristigen Planungshorizont (2021–2050) beträgt dieser Anstieg etwa 1,1 bis 1,5 °C (mittlere Übereinstimmung). Der Unterschied zwischen den durch die Klimaprojektionen (Klimaschutz-Szenario und Weiter-wie-Bisher-Szenario) projizierten Änderungen ist gering. Die Bandbreite der Ergebnisse liegt zwischen 0,8 und 2,3 °C. Die Temperaturentwicklung für den langfristigen Planungshorizont wird stark vom gewählten Szenario bestimmt. Basierend auf dem Klimaschutz-Szenario ist eine Erhöhung um 1,1 °C zu erwarten (mittlere Übereinstimmung). Die Änderung im Vergleich zum frühindustriellen Zustand beträgt 1,9 °C. Unter den Bedingungen des Weiter-wie-bisher-

Szenarios beträgt die Erwärmung etwa 3,8 °C (mittlere Übereinstimmung). Die Bandbreite der Ergebnisse liegt zwischen 2,7 und 5,2 °C.

Extremwerte

Mit der Zunahme der mittleren Temperatur geht eine markante Änderung der Temperaturextreme einher. Mit tiefen Temperaturen verbundene Extreme nehmen stark ab, während mit Wärme verbundene Extreme stark zunehmen (sehr hohe Übereinstimmung). Dadurch steigt die Häufigkeit von Hitzewellen.

2.3. Der Clausius-Clapeyron-Effekt

Mit jedem Kelvin Temperaturzunahme erhöht sich nach Clausius-Clapeyron (CC) der Sättigungsdampfdruck des Wassers im atmosphärischen Temperatur- und Druckbereich um etwa 7 %. Warme Luftmassen können folglich mehr Wasserdampf aufnehmen als kalte. Damit steigt mit der Temperatur auch das Starkregenpotenzial einer Luftmasse. Diesen Effekt macht man sich zunutze, um potenzielle Niederschlagstrends auf Basis robuster Temperaturzunahmen in Beobachtungen und Klimaprojektionen abzuschätzen.

Eine Zunahme der Niederschlagsintensität mit der Temperatur wurde bereits in mehreren Studien beobachtet. Dabei zeigt sich, dass sogar Zunahmen auftreten, die oberhalb der CC-Rate bis hin zu einer Zunahme um 14 % (Super-CC-Scaling) liegen. WESTRA et al. (2014) fassen in ihrem Papier Beobachtungs- und Modellstudien zusammen und diskutieren mögliche physikalische Zusammenhänge zwischen Temperatur und Niederschlagsintensität. MARTINKOVA UND KYSELY (2020) beschreiben in einem Review Beobachtungsstudien, die sowohl positive als auch negative Skalierungen analysierten. Die wichtigsten Ergebnisse lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Es gibt deutliche Hinweise darauf, dass Niederschlagsextreme kurzer Dauerstufen (stündlich und kürzer) und geringer räumlicher Ausdehnung eine Skalierung oberhalb der Clausius-Clapeyron-Rate zeigen. Beobachtungen deuten auf eine CC-Skalierung unterhalb von 12 °C und eine Super-CC-Skalierung zwischen 12 °C und 24 °C für extreme Niederschlagsintensitäten hin. Die Temperaturschwellenwerte sind vom Ort der Untersuchung und der räumlichen und zeitlichen Wahl des Temperaturwertes abhängig und können in einzelnen Studien abweichen
- Diese Zunahme erklärt sich zum Teil durch die höhere Wahrscheinlichkeit des Auftretens konvektiver Niederschläge (mit höheren Intensitäten im Vergleich zu stratiformen Niederschlägen) mit steigenden Temperaturen, aber auch durch die Verstärkung der dynamischen Prozesse der Wolken- und Niederschlagsbildung.
- Die Größe der Skalierung hängt stark von der Ereigniszeitskala ab, mit größeren Raten bei Ereignissen mit Andauern von einer Stunde und weniger als bei Tageswerten.
- Es gibt Hinweise auf eine Limitierung des Effekts aufgrund des eintretenden Feuchte-defizits. Dieser Effekt, der zu einem Stopp oder sogar zu einer Umkehrung der Skalierungsrate führt, tritt in gemäßigt-feuchtem Klima bei Temperaturen oberhalb von ca. 24 °C auf. Das negative CC-Scaling oberhalb des Temperaturschwellenwerts kann auch durch die Unterschätzung hoher Perzentile bei zu geringen Fallzahlen beeinflusst sein.

WESTRA et al. (2014) illustrieren darüber hinaus 3 mögliche wolkendynamische Effekte, die mit dem CC-Scaling einhergehen und dieses verstärken können (Super-CC-Scaling):

- Zunahme des Feuchtgehalts,
- Verstärkung der Wolkendynamik,
- Erhöhung des Luftmassenflusses aus der Umgebung.

Diese Effekte beeinflussen die Niederschlagsintensität, die Niederschlagssumme und die Größe eines Niederschlagsereignisses –

3 Attribute, die auch der im KlamEx-Projekt verwendete Ereigniskatalog beinhaltet.

Insgesamt handelt es sich um theoretische Modellüberlegungen zur Wolkendynamik. Das tatsächliche regionale Starkregengeschehen hängt darüber hinaus maßgeblich von den großräumigen Wetterlagen ab. Potenzielle globale Klimaänderungen, z. B. Änderungen der Häufigkeit bestimmter Wetterlagen oder meridionale Verlagerungen vorherrschender Windsysteme, beeinflussen die lokalen Gegebenheiten und überlagern den Temperatureffekt. Es lassen sich dementsprechend nur Aussagen bezüglich des Starkregenpotenzials bei steigenden Temperaturen treffen, nicht aber bezüglich tatsächlicher lokaler Trends, die davon abweichen können.

Der RADKLIM-Datensatz und der darauf basierende Ereigniskatalog stellen zum ersten Mal Datengrundlagen dar, um das potenzielle (Super-)CC-Scaling in Deutschland bezüglich der Intensität, der Fläche und der charakteristischen Dauerstufe adressieren zu können. Dabei stellt die Verwendung der charakteristischen Ereignisattribute eine Besonderheit dar. Die Aussagekraft der Analyse im Rahmen von KlamEx ist aufgrund der kurzen Zeitreihe der Daten – insbesondere der verfügbaren TRJ-Basisdaten – sowie der Datenauflösung von einer Stunde noch limitiert. Eine Erhöhung der Auflösung unter Zugrundelegung des fünfminütigen YW-Produkts sollte in diesem Zusammenhang angestrebt werden, ginge allerdings mit einer deutlichen Erhöhung der Rechenzeit einher, sodass im Rahmen des zeitlich limitierten Projekts eine Beschränkung auf den RW-basierten Katalog erfolgen musste.

2.4. Stadtklimaeffekt

Eine Stadt besitzt auf vielfältige Weise Einfluss auf die Meteorologie und Klimatologie. Ein bedeutender und der vermutlich bekannteste Effekt ist die Ausbildung einer städtischen Wärmeinsel (Urban Heat Island, UHI; z. B. KUTTLER, 1997). Städte beeinflussen durch veränderte Strahlungs- und Energiebilanzen und anthropogene Wärme insbesondere die Temperatur in den Ballungsräumen.

Einflüsse entstehen z. B. durch veränderte Luftmassenbewegungen aufgrund der Bebauung oder durch verringerte Verdunstung aufgrund der Versiegelung von Flächen. Insgesamt kommt es zu einer deutlichen Erhöhung der Temperatur in Städten, insbesondere zu deutlich verringerten Abkühlungsraten während der Nacht. Im Rahmen des Klimawandels geht man von einer weiteren Verstärkung des Effekts aufgrund der projizierten Temperaturerhöhung aus.

Die veränderten Temperatur- und Feuchteflüsse, die Aerosolemissionen sowie die veränderte Rauigkeit durch die Bebauung können Einflüsse auf das Niederschlagsgeschehen besitzen. So können diese Effekte separat betrachtet die Niederschlagsbildung zum einen durch intensivierte Konvektion verstärken, zum anderen durch die Beeinflussung der Wolkenmikrophysik verzögern oder sogar verhindern. Die synergetischen Effekte sind komplex und können durchaus variieren.

Der Einfluss der Stadt auf den Niederschlag lässt sich in 4 Punkten zusammenfassen (LIU et al. 2019, HUFF UND CHANGNON 1973):

- Thermischer Effekt oberhalb des urbanen Gebiets aufgrund der atmosphärischen Instabilität bedingt durch die UHI
- Staueffekte durch die Behinderung des Luftmassenflusses in der Umgebung des urbanen Gebiets zusammen mit erhöhter mechanischer Turbulenz in der unteren Grenzschicht
- Einflüsse des urbanen Aerosols und der Verschmutzung, die zu Veränderungen der Wärmeprofile, Wolken und mikrophysikalischen Prozesse oberhalb der Stadt führen
- Modifikationen der unteren Grenzschicht bezüglich der Feuchte- und Wärmeeigenschaften ausgelöst durch anthropogene Quellen und Verdunstung auf Grünflächen

Diese physikalischen Wechselwirkungen beeinflussen die Niederschlagsbildung oberhalb sowie in der Umgebung größerer urbaner Gebiete. Dabei können die Einflüsse abhängig von der gegebenen Wettersituation oder auch der Größe und Lage der Stadt unterschiedliche synergeti-

sche Wirkungen zeigen und sowohl negative als auch positive Effekte auf die Niederschlagsbildung besitzen. Ergebnisse von Beobachtungen (Fallstudien und Klimatologien) und Modellstudien zeigen diesbezüglich durchaus unterschiedliche Ergebnisse. LIU et al. (2019) fassen in ihrer Metanalyse (Analyse verfügbarer Publikationen) die vorhandenen Ergebnisse als Mittelwerte mit Schwankungsbreite zusammen. Die Entfernungen zur Stadt beziehen sich immer auf die vorherrschende Anströmrichtung

- Zunahme um 16 % (11 % – 21 %) oberhalb der Stadt
- Zunahme im Lee um 18 % (14 % – 22 %) 52 km hinter der Stadt
- Zunahme im Luv um 1 % (-1 % – 3 %) 36 km vor der Stadt
- Zunahme um 4 % (0 % – 8 %) 26 km rechts von der Stadt
- Zunahme um 2 % (-3 % – 7 %) 30 km links von der Stadt

Eine starke Zunahme des mittleren Niederschlags wird von vielen Studien direkt oberhalb sowie im Lee von Großstädten beobachtet. Die weiteren Effekte vor und neben der Stadt sind eher von geringerer Größenordnung und z. T. vom Vorzeichen her nicht eindeutig. Aus diesen Überlegungen resultiert somit insbesondere die Erwartung einer Erhöhung der Niederschlags-tätigkeit oberhalb sowie im Lee großer Städte. Im Rahmen von KlamEx stellte sich die Frage, ob ein Stadteffekt auch in Bezug auf extreme Niederschlagsereignisse erkennbar ist.

Klimatologische Nachweise eines Stadteffekts erfordern streng genommen den Vergleich der Niederschlagsverteilung zweier vergleichbarer Regionen mit und ohne urbanen Einfluss. Derartige Beobachtungen sind im dicht besiedelten Deutschland mit starker topografischer Struktur nicht oder nur eingeschränkt möglich, insbesondere, wenn man die mit über 50 km recht große Distanz zum beobachteten Lee-Effekt bedenkt. An einzelnen Städten lassen sich potenziell beobachtbare, etwaige Effekte hingegen nicht eindeutig einem urbanen Einfluss zuordnen. Hinzu kommt, dass radarbasierte Messungen

im urbanen Raum stärker fehlerbehaftet sind, insbesondere in der unmittelbaren Nähe eines Radarstandortes, sodass bis zur Erneuerung des DWD-Radarverbundes mit der Verlegung einiger Radarsysteme aus den Großstädten ins Umland viele deutsche Großstädte messtechnisch nur unzureichend erfasst werden konnten. Im Rahmen des Projekts musste sich die Untersuchung in dieser Frage daher auf eine qualitative Analyse anhand einer Fallbetrachtung beschränken.

Neben dem Stadteffekt auf die Niederschlags-tätigkeit und -verteilung haben urbane Strukturen umgekehrt potenziell Einfluss auf den Impact extremer Niederschlagsereignisse. Beispielsweise führt die Versiegelung von Flächen zu einer geringeren Versickerung und verstärktem Oberflächenabfluss mit potenziellen Auswirkungen auf die Überflutungsgefährdung. Städte sind darüber hinaus aufgrund ihrer zumeist hohen Bevölkerungsdichte und Vielzahl kritischer Infrastrukturen vulnerabler gegenüber Extremereignissen.

2.5. Persistenz extremer Wetterlagen

Der Temperaturanstieg aufgrund des anthropogenen Klimawandels lässt sich in weltweiten Messdaten nachweisen. Dabei gibt es Hinweise darauf, dass sich die arktischen Gebiete überproportional stark erwärmen. Diese „Arctic Amplification“ führt dazu, dass sich die Temperaturgegensätze zwischen den Polargebieten und den gemäßigten Breiten und Tropen verringern. Die damit verbundene Abschwächung des Jetstreams und die Stabilisierung der planetaren Wellen der Nordhemisphäre werden mit einer verstärkten Persistenz von Wetterlagen und damit einhergehender Erhöhung der Häufigkeit lang anhaltender extremer Wetterperioden, insbesondere im Sommer, in Zusammenhang gesehen (MANN et al. 2018). Die aktuellen Klimamodelle stimmen bezüglich der projizierten Änderungen der atmosphärischen Zirkulation nicht überein, sodass der Effekt nicht belegt, aber auch nicht ausgeschlossen werden kann (HUGUENIN et al. 2020). Eine erhöhte Persistenz bedeutete, dass sowohl Hochdruckwetterlagen ohne Nieder-

schlag stabiler würden und somit häufiger Dürren auslösten, als auch dass niederschlagsreiche Wetterlagen lang anhaltender würden. Eine Folge davon wäre, dass extreme Niederschlagsereignisse auf einen bereits feuchten oder gesättigten Boden oder im urbanen Raum auf eine bereits belastete Kanalinfrastruktur träfen und somit die potenzielle Schadwirkung von Extremereignissen erhöht wäre.

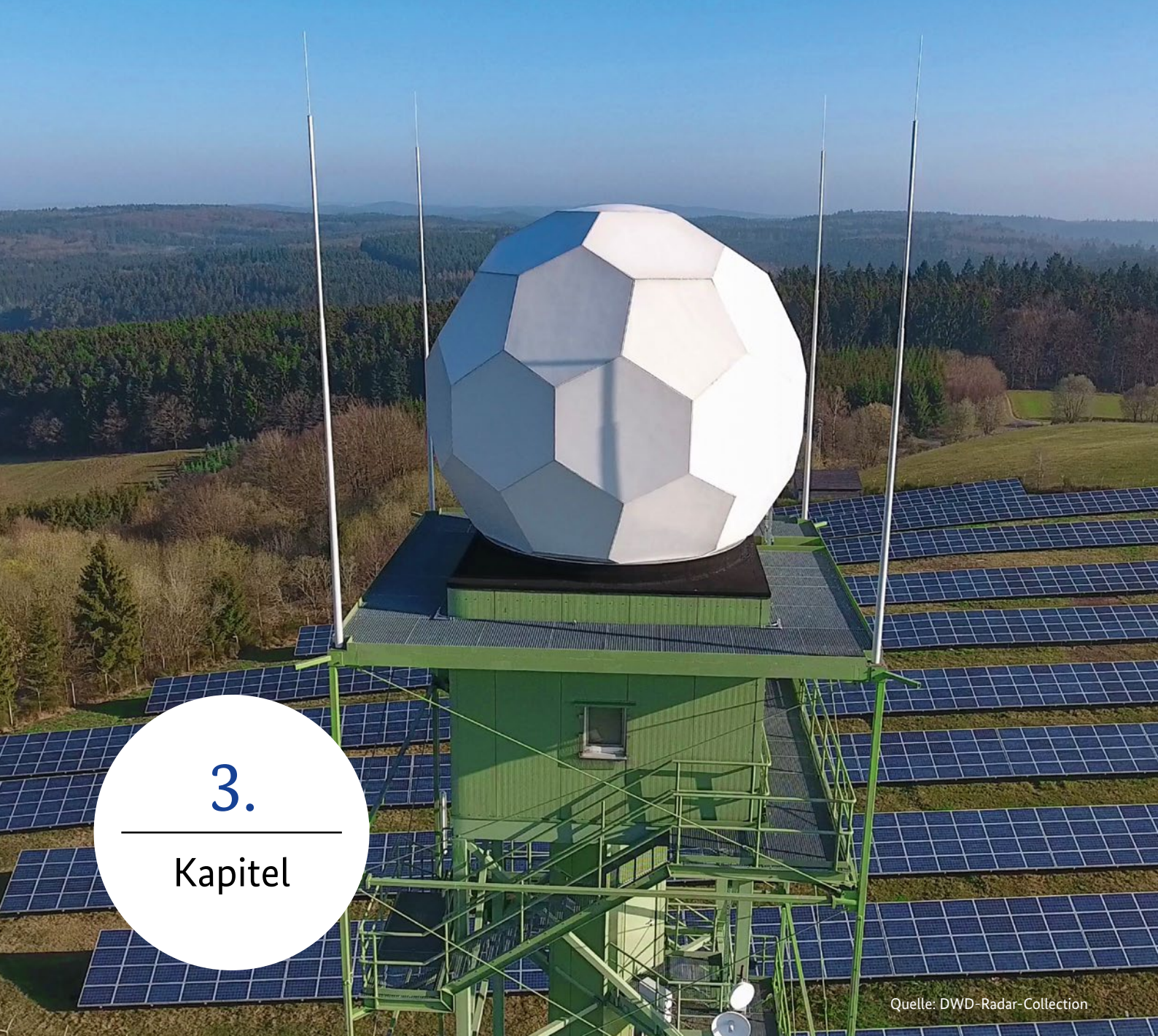
Der vorliegende Ereigniskatalog führt umfangreiche Informationen über das Auftreten von Extremereignissen, die vorherrschende Wetterlage und weitere Attribute wie den Vorregenindex zusammen. Im Rahmen von KlamEx wurde der Vorregenindex nach ZAISS (1989) als Proxy für Perioden aufeinanderfolgender Niederschläge ausgewertet.

2.6. Fragestellungen

Aus den theoretischen Vorüberlegungen lassen sich folgende Fragen formulieren, zu deren Beantwortung die Arbeiten im Projekt beitragen können.

1. Gibt es einen Zusammenhang zwischen den Ereignisseigenschaften und der Temperatur – und falls ja: Welche Schlüsse können daraus im Hinblick auf eine Änderung des Starkregenpotenzials im Rahmen des Klimawandels gezogen werden?
2. Gibt es einen Stadteffekt auf extreme Niederschlagsereignisse?
3. Gibt es einen erkennbaren Zusammenhang zwischen urbanen Stadteigenschaften und den Einsatzzahlen bei Extremereignissen?

Die für das Frühjahr 2021 angestrebte Publikation der Kataloge eröffnet schließlich die Möglichkeit, die Daten weiteren Analysen zu unterziehen und über dieses Projekt hinausgehende interessante Fragen zu beantworten.



3.

Kapitel

Quelle: DWD-Radar-Collection

Datengrundlage und Konzepte

In diesem Kapitel werden Daten und Konzepte vorgestellt, die im Rahmen der Erstellung und statistischen Analyse der Ereigniskataloge Verwendung finden.

3.1. RADKLIM

Die Datengrundlage für die Ermittlung der extremen Niederschlagsereignisse stellt die radarbasierte Niederschlagsklimatologie RADKLIM (Version 2017.002) dar. Der Datensatz resultiert aus dem Vorgängerprojekt „Radar-klimatologie“ der Strategischen Behördenallianz „Anpassung an den Klimawandel“. Nähere Informationen zum Projekt und zur daraus resultierenden Leistung RADKLIM sind unter www.dwd.de/radklm zu finden, insbesondere im Projektabschlussbericht. Die Niederschlagsdaten sind über den Opendata-Server des DWD frei verfügbar. Im Folgenden werden die im Rahmen von KlamEx verwendeten Niederschlagsdaten und statistischen Niederschläge kurz vorgestellt.

3.1.1. Niederschlagsdaten

Grundlage für die Bestimmung der Ereigniskataloge stellen die stündlich angeeichten Niederschlagssummen (RW-Produkt) dar (WINTERRATH et al. 2018). Die Daten sind das klimatologisch aufbereitete Pendant zum RW-Produkt aus der Echtzeitproduktion RADOLAN (www.dwd.de/radolan). Es handelt sich dabei um radarbasierte Niederschlagsabschätzungen, die an quantitative Niederschlagsmessungen der Messstationen angeeicht werden. Die Stundensummen gelten jeweils von (hh-1):51 bis hh:50. Die Daten liegen zum Zeitpunkt der Berichterstellung beginnend mit dem 01.01.2001 bis zum 31.12.2019 vor und werden jährlich um das vergangene Jahr fortgeschrieben. Im Rahmen der Reprozessierung wurden zusätzliche Verfahren zur Verbesserung der Qualität des Produkts im Hinblick auf eine klimatologische Anwendbarkeit durchgeführt:

- Anwendung des aktuellen Algorithmus des operationellen Echtzeitverfahrens zur Aneicherung der radarbasierten Niederschlagsdaten an die Stationsdaten
- Verwendung zusätzlicher disaggregierter Tageswertdaten zur Verbesserung der Quantifizierung
- Zusätzliche Fehlererkennung
- Klimatologische Korrektur der Signalabnahme mit der Höhe bzw. Entfernung aufgrund von Dämpfung, Overshooting und teilweise ausgefüllter Messvolumina

Die RADKLIM-Daten liegen auf einem Gitter mit einer Gitterweite von 1 km x 1 km in polarstereografischer Projektion vor. Im Folgenden wird die Pixelgröße mit einem Quadratkilometer gleichgesetzt. Aufgrund der Verwendung eines seit 2001 verfügbaren Eingangsprodukts der aktuell 17 lokalen Radarstandorte des DWD-Messnetzes mit einer Reichweite von 128 km sind weite Teile Deutschlands abgedeckt. Ausnahmen stellen einige Randgebiete Deutschlands dar, die entweder nicht oder nur zeitweise im Abdeckungsbereich lagen. Darüber hinaus gehen die Daten des Ausfallsicherungsradars Borkum aktuell nicht in die Klimatologie ein, da die sehr starken Störeffekte durch Offshore-Windparks derzeit noch nicht effektiv korrigiert werden können und somit eine Verfälschung der Ergebnisse bewirken würden. Aus diesem Grund ist der Nordwesten Deutschlands seit der Abschaltung des Radars Emden im Jahr 2018 nicht mehr durch RADKLIM abgedeckt. Abbildung 2 zeigt die Datenabdeckung für die Jahre 2001 bis 2019. In den Ergebniskarten sind im Folgenden alle Regionen schraffiert, die Datenlücken von mehr als 7,5 % bezogen auf die Gesamtzeit aufweisen. Diese Ergebnisse sind nicht oder nur eingeschränkt belastbar.

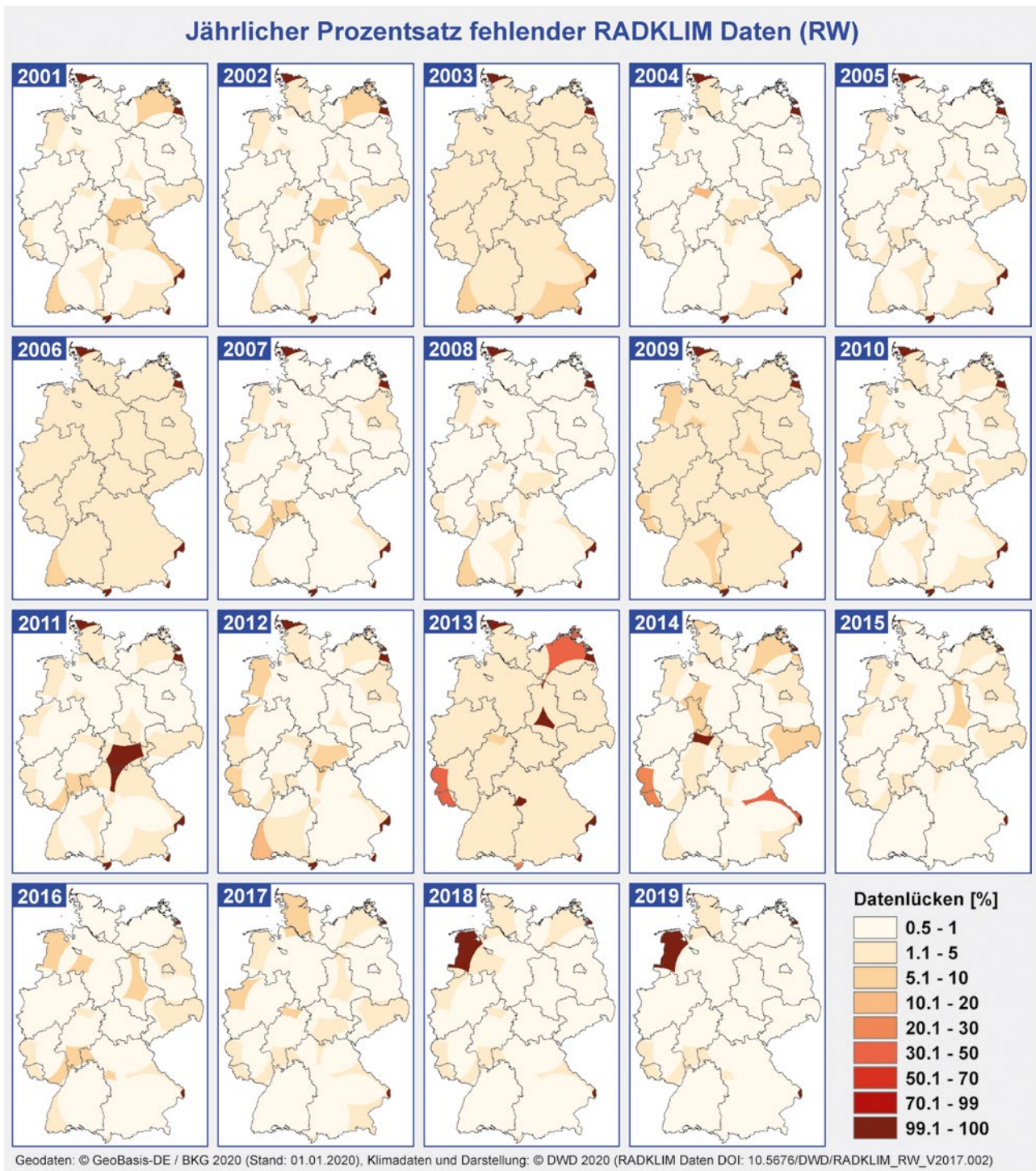


Abb. 2: Jährlicher Prozentsatz fehlender RW-Produkte des RADKLIM-Datensatzes 2017.002 von 2001 bis 2019. Datenlücken sind insbesondere in einigen Grenzregionen Deutschlands sowie in Regionen, in denen über einen längeren Zeitpunkt aufgrund der Erneuerung des Radarnetzwerks des Deutschen Wetterdienstes keine Radarabdeckung gewährleistet war, zu erkennen.

3.1.2. Statistische Niederschläge

Statistische Niederschläge oder Bemessungsniederschläge geben an, welche Niederschlagsmengen pro Dauerstufe im Mittel an einem bestimmten Ort mit einer bestimmten Häufigkeit zu erwarten sind. Sie finden insbesondere in der Bemessung von Entwässerungssystemen, z. B. Kanalsystemen, Anwendung. Die statistischen Niederschlagswerte resultieren aus extremwertstatistischen Auswertungen von Niederschlagszeitreihen. Im Rahmen des Radarklimaprojekts wurde ein Verfahren entwickelt, um die extremwertstatische Analyse auf Basis des DWA-Arbeitsblatts 531 (DWA, 2012), die den stationsbasierten amtlichen Bemessungsniederschlägen KOSTRA-DWD (JUNGHÄNEL et al. 2017) zugrunde liegt, zu automatisieren und auf die RADKLIM-Zeitreihen anzuwenden. Hierbei werden die n ranghöchsten Werte pro Pixel – mit $n =$ zweimal die Länge der Zeitreihe in Jahren – selektiert, auf einen potenziellen Ausreißer untersucht und mit einer Exponentialverteilung angenähert. Die resultierenden – für alle Dauerstufen unabhängig ermittelten – Koeffizienten der Verteilung werden anschließend über einen doppeltlogarithmischen Ausgleich über alle Dauerstufen korrigiert. Die Berechnung der statistischen Niederschlagsschwellenwerte RR nach Wiederkehrzeiten T erfolgt schließlich nach folgender Formel:

$$RR(D, T) = u(D) + w(D) \ln(T).$$

Die Ergebnisse zeigen, dass extreme Niederschläge kurzer Dauerstufe deutlich weniger an die Orografie gebunden sind, als dies auf Basis der Stationsdaten ermittelt wurde. Die Beobachtungsdaten zeigen, dass in ganz Deutschland mit einer Gefährdung durch extreme Starkregenereignisse zu rechnen ist. Ursachen für die abweichenden Ergebnisse sind vermutlich die unzureichende Repräsentativität des Stationsmessnetzes für lokale Starkniederschläge sowie eine Überschätzung der orografischen Verstärkung bei der Interpolation. Aufgrund der noch sehr kurzen Zeitreihe mit 19 Jahren sind die Ergebnisse auf der Basis von RADKLIM jedoch noch nicht robust. Um eine konsistente Einschätzung der Wiederkehrzeiten einzelner Starkregenmengen in KlamEx zu gewährleisten, ist

die Verwendung der Statistischen Niederschläge aus RADKLIM dennoch notwendig: zum einen, da diese eine konsistente räumliche Verteilung aufweisen, zum anderen, da die RADKLIM-Daten Mittelwerte über eine Fläche von einem Quadratkilometer darstellen und somit die gemessenen Extremwerte naturgemäß geringer ausfallen als die an Stationen gemessenen Punktwerte. Diese sind daher nicht direkt vergleichbar.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass zu erwarten ist, dass sich die statistischen Niederschläge auf Basis von RADKLIM mit jedem Jahr der Fortschreibung ändern werden. Trotz der noch kurzen Zeitreihe sind die Ergebnisse in den letzten Jahren schon sehr stabil. Es ist hingegen wahrscheinlich, dass große lokale Gradienten durch Einzelereignisse hervorgerufen werden können, die aufgrund der kurzen Zeitreihe ein hohes Gewicht besitzen. Um den Einfluss einzelner extremer Ereignisse auf die gegitterten statistischen Niederschläge zu reduzieren, wurden die Daten unter Anwendung des RADKLIM-Qualitätsprodukts selektiert und eine Glättung der Werte über einen Radius von 10 km wurde durchgeführt.

Die statistischen Niederschläge aus RADKLIM sind aufgrund der oben genannten Einschränkungen zum jetzigen Zeitpunkt nicht zur Anwendung in der Bemessung geeignet und stehen nicht extern zur Verfügung.

3.2. TRJ-Basisdaten

In die statistischen Analysen der KlamEx-Ergebnisse gehen Daten der Temperatur ein. Die Basisdaten zur Ableitung von Testreferenzjahren (TRJ, KRÄHENMANN, 2017) liegen zeitlich und räumlich hochaufgelöst vor und bieten somit die Möglichkeit einer direkten Verknüpfung mit den gerasterten Niederschlagsdaten. Die TRJ-Basisdaten basieren auf interpolierten Stationsmessdaten. Die Temperaturdaten wurden darüber hinaus über die Berücksichtigung von Proxydaten skaliert, um den Effekt der urbanen Wärmeinsel zu berücksichtigen. Die Daten liegen für die Zeit von 1995 bis 2012 vor.

3.3. Geodaten

Um den Niederschlagsereignissen geografische Variablen zuzuordnen sowie eine Verschneidungsanalyse mit Einsatzdaten durchzuführen, wurden

verschiedene Geodatensätze verwendet (Tabelle 1). Sie wurden zu diesem Zweck von ihren jeweiligen Quellprojektionen auf die polarstereografische Projektion der RADKLIM-Daten umprojiziert.

Geografische Parameter	Datensatz	Auflösung	Datenquelle
Einwohnerzahl und Bevölkerungsdichte	Zensus2011 (Deutschland)	100-m-Raster	© Statistisches Bundesamt, Wiesbaden 2015,
	GEOSTAT2011 (Europa)	1-km-Raster	© Eurostat, EFGS
Siedlungsgrad	The European Settlement Map 2016 (Europa)	100-m-Raster	© European Union, Copernicus Land Monitoring Service 2016, European Environment Agency (EEA)
Versiegelungsgrad	The Imperviousness Density 2015 (Europa)	100-m-Raster	© European Union, Copernicus Land Monitoring Service 2018, European Environment Agency (EEA)
Landnutzung	CORINE LAND COVER (2000, 2006, 2012, 2018; Europa)	100-m-Raster	© European Union, Copernicus Land Monitoring Service 2018
Höhe über Meeresniveau	SRTM 3 Digital Elevation Model, Void Filled (Weltweit)	3-Bogensekunden-Raster	© USGS 2016
TPI (Topographic Position Index)	DGM - Digitales Geländemodell (Deutschland)	50-m-Raster	© GeoBasis-DE/BKG 2015 (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie)

Tab. 1: In KlamEx verwendete geografische Parameter mit Auflösung und Datenquelle.

Der Urban Heat Island (UHI) Index stellt eine spezielle Kombination verschiedener Geoparameter dar und wurde nach KRÄHENMANN (2017) aus den CORINE-Landnutzungsklassen abgeleitet. Der UHI-Index ist ein Maß für die Urbanisierung.

Der Topographic Position Index (TPI) beschreibt, ob ein Pixel eine Kuppe (positiver TPI) oder eine Senke (negativer TPI) darstellt. Berechnet wird der TPI aus der Differenz der Höhe des zentralen Pixels zum Mittelwert seiner ihn umgebenden Zellen. Im Rahmen der KlamEx-Auswertungen wurde hierzu mit einem Geländemodell mit 50 m Auflösung und einer Umgebung von 2 km gerechnet.

3.4. Die Warnschwellen des DWD

Der Deutsche Wetterdienst warnt die Bevölkerung mit einem dreistufigen System vor wetterbedingten Gefahren. Absolute, deutschlandweit einheitliche Schwellenwerte definieren die Übergänge der Warnstufen vor markantem Wetter, Unwetter und extremem Unwetter. Die Niederschlagsschwellenwerte liegen für unterschiedliche Dauerstufen vor. Dabei wird zwischen einer Warnung vor Starkregen mit Dauerstufen von einer bzw. 6 Stunden und Dauerregen von Dauerstufen von 12, 48 oder 72 Stunden unterschieden. Dabei muss mindestens der Schwellenwert einer Dauerstufe überschritten werden.

Dauerstufe [h]	1	2	3	4	6	9	12	18	24	48	72
Mindestfläche [# Pixel ≈ km ²]	9	9	9	12	18	27	36	54	72	144	216
Statistischer Niederschlag [mm] nach RADKLIM ≥ 5a	14,8 bis 28,8	18,9 bis 36,5	21,4 bis 42,8	22,4 bis 53,0	26,1 bis 56,0	29,2 bis 65,7	31,6 bis 73,5	35,2 bis 87,3	37,8 bis 99,6	44,4 bis 137,8	48,7 bis 167,6
Warnstufe 3 [mm]	≥ 25	≥ 27	≥ 29	≥ 31	≥ 35	≥ 37,5	≥ 40	≥ 45	≥ 50	≥ 60	≥ 90

Tab. 2: Schwellenwerte für die Mindestfläche eines Ereignisses sowie die Niederschlagsmengen entsprechend einer Wiederkehrzeit von 5 Jahren und der Warnstufe 3 (linear interpoliert für nicht definierte Dauerstufen). Die Werte des statistischen Niederschlags geben die minimalen und maximalen Werte in Deutschland (Datenbasis: geglättete Werte aus RADKLIM von 2001 bis 2019) wieder.

Für die Anwendung im Rahmen von KlamEx wurden die Warnschwellen für die fehlenden Dauerstufen linear interpoliert. Tabelle 2 zeigt die Schwellenwerte der Warnstufen sowie die interpolierten Werte.

3.5. Die Extremität

Die Einordnung der „Stärke“ eines Extremereignisses kann über verschiedene Eigenschaften erfolgen. Ein Parameter, der im Rahmen von KlamEx als Haupteigenschaft eines Ereignisses herangezogen wurde, ist die Extremität $E_{t,a}$, welche die Ereignisfläche über den effektiven Radius r_{eff} mit der Ereignisintensität am Ort, ausgedrückt über die mittlere logarithmierte Wiederkehrzeit T_{log} , verknüpft:

$$E_{t,a} = \frac{\sum_{i=1}^n \log(T_{t,i}) \sqrt{a}}{n \sqrt{\pi}} = \overline{T_{log}} \cdot r_{eff}$$

Dabei ist t die Dauerstufe, a die Fläche, n die Anzahl der Pixel pro Objekt und $T_{t,i}$ die Wiederkehrzeit. Der Ansatz basiert auf dem Weather Extremity Index von MÜLLER UND KASPAR (2014). Die Idee ist, die Extremität eines Ereignisses über den potenziellen Impakt zu definieren. Neben der Intensität des Niederschlags, ausgedrückt durch die statistische Wiederkehrzeit am Ort des Geschehens, erhöht sich die potenzielle Schadwirkung mit der Größe des Ereignisses. Im Gegensatz zum originalen Ansatz wird $E_{t,a}$ im Rahmen der Katalogerstellung nicht über ein

niederschlagsunabhängiges, geografisches Gebiet, sondern für Niederschlagsobjekte definierter Größe berechnet. Da der Absolutwert von $E_{t,a}$ nur eine geringe Aussagekraft hat, wird $E_{t,a}$ im Folgenden ohne Einheit angegeben.

3.6. Der Vorregenindex

Der Vorregen- oder auch Vorfeuchteindex ist ein objektivierte Maß für den auf der gefallenem Niederschlagsmenge beruhenden Bodenwassergehalt und damit potenziell mit dem Impakt eines Extremereignisses verknüpft. Bestimmt wird der Vorregenindex über die gewichtete Summe der vorangegangenen täglichen Niederschlagswerte, wobei die Gewichte mit der vergangenen Zeit abnehmen. Im Rahmen des Projekts wurden 2 Vorregenindizes entsprechend den Angaben des Ministeriums für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten Rheinland-Pfalz (heute: Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie und Mobilität) verwendet: ein Vorregenindex, der die Niederschläge bis zu 30 Tage vor dem aktuellen Datum einbezieht (VN30), sowie der Vorregenindex nach ZAIß (1989), der bis 21 Tage zurückgeht und zusätzlich eine Abhängigkeit der potenziellen Verdunstung von der Jahreszeit berücksichtigt. Beide Indizes summieren die Tagesniederschläge, die mit einem Abminderungsfaktor c_i multipliziert werden. Die Abminderungsfaktoren ergeben sich aus den folgenden Gleichungen:

VN30: $c_i = 0,9^i$

VN21: $c_i = (0,796 \cdot \exp(0,0047 \cdot WZ))^i$

mit $i = i$ -ter Vortag und $WZ =$ hydrologische
Wochenzahl.

Im Rahmen von KlamEx wurde der VN21 nach
Zaiß (1989) ausgewertet.

3.7. Der Starkregenindex (SRI)

Der Starkregenindex (SRI, SCHMITT et al. 2018) ist ein mit einer definierten Farbgebung versehener Index, der eine einheitliche und verständliche Kommunikation der Niederschlagsintensität von Extremereignissen beinhaltet. Der Index hängt dabei bis zu einem SRI von 7 von der dauerstufenabhängigen Wiederkehrzeit des Niederschlags ab. Die Schwellenwerte für Starkregenindizes von 8 bis 12 leiten sich unter der Anwendung von Erhöhungsfaktoren aus den statistischen Niederschlägen mit einer Wiederkehrzeit von 100 Jahren ab. Der jeweilige Starkregenindex ist darüber hinaus aus hydrologischer Sicht mit einem potenziellen Impact versehen. Tabelle 3 zeigt die entsprechenden Wiederkehrzeiten und Erhöhungsfaktoren sowie die im Rahmen von KlamEx verwendete Farbtabelle (<http://abwassernetzwerk-rheinland.nrw/starkregenvorsorge/>). Die Schwellenwerte zur Bestimmung des SRI wurden im Rahmen von KlamEx auf der Basis der statistischen Niederschläge aus RADKLIM (vgl. Abschnitt 3.1.2) berechnet. Im Rahmen der Ereignisattributierung in KlamEx wird der SRI für die charakteristische Dauerstufe eines detektierten Ereignisses als maximaler Wert und Mittelwert über die Ereignisfläche angegeben.

3.8. Die Objektive Wetterlagenklassifikation

Die Objektive Wetterlagenklassifikation (OWLK) des DWD analysiert die täglichen Wetterbedingungen in Deutschland und weist ihnen eine typische Wetterlage zu.

Wiederkehrzeit [Jahre]	Erhöhungsfaktor	SRI
> 1 – 2	1,00	1
> 2 – 5		2
> 5 – 10		3
> 10 – 25		4
> 25 – 33,5		5
> 33,5 – 50		6
> 50 - 100		7
> 100	1,20 – 1,39	8
	1,40 – 1,59	9
	1,60 – 2,19	10
	2,20 – 2,79	11
	$\geq 2,80$	12

Tab. 3: Werte des SRI mit Farblegende nach <http://abwassernetzwerk-rheinland.nrw/starkregenvorsorge/>.

Das Verfahren nutzt dafür Ergebnisse des operationellen numerischen Wetteranalysen- und Vorhersagesystems des DWD. Es ordnet einmal täglich die Wetterlage über Mitteleuropa einer von 40 möglichen Klassen zu. Die tägliche Datengrundlage bildet die numerische Wetteranalyse (der modellierte Ist-Zustand der Wetterdaten) eines der operationellen Vorhersagemodelle des DWD zum Zeitpunkt 12 UTC. Als meteorologische Kriterien gehen die Windrichtung (Advektionsrichtung der Luftmassen, z. B. NO = Nordost), die Zyklonalität (Hoch- bzw. Tiefdruckeinfluss, A = antizyklonal, Z = zyklonal) am Boden und in der mittleren Troposphäre sowie die Feuchtigkeit der Atmosphäre (F = feucht, T = trocken) in die Analyse ein. Die Datenreihe beginnt am 01.07.1979 und wird fortlaufend weitergeführt. Weiterführende Informationen finden sich in DITTMANN et al. (1995) oder unter <https://www.dwd.de/DE/leistungen/wetterlagenklassifikation/wetterlagenklassifikation.html>



Quelle: pixabay/vonriesling

4.

Kapitel

Der Ereigniskatalog – Methodik

Dieses Kapitel umfasst die detaillierte Beschreibung der im Rahmen der Projekte KlamEx und GDV-Starkregen (LENGFELD, 2020) entwickelten Definition eines extremen Niederschlagsereignisses, die Wahl geeigneter Parameterschwellenwerte sowie die Auswahl zugehöriger Attribute. Das Verfahren ermöglicht die Erstellung verschiedener Kataloge mit differierenden Schwellenwerten. In KlamEx wurden 2 Katalogvarianten untersucht, die im Folgenden eingeführt werden. Die Hauptelemente des im Rahmen des Projekts verwendeten Katalogs der Version 2020.01 sind in Kapitel 4.2 gelistet. Der DWD arbeitet weiterhin an einer Weiterentwicklung der Kataloge. Darüber hinaus ändern sich ausgewählte Katalogattribute mit der jährlichen Fortschreibung, sodass in Zukunft – auch für zurückliegende Jahre – Änderungen der Ereignisattribute möglich und zu erwarten sind.

4.1. Ereignisdefinition

Es existiert in der Literatur nach Kenntnis der Autorinnen keine eindeutige Definition für ein Wetter- oder Extremereignis. Dabei sind sowohl der Begriff „Ereignis“ als auch die Kategorisierung „extrem“ nicht eindeutig, sie werden je nach Forschungs- und Anwendungsbereich unterschiedlich definiert.

Das DWD-Lexikon (www.dwd.de/lexikon) umschreibt den Begriff „Starkregen“ folgendermaßen: „Von Starkregen spricht man bei großen Niederschlagsmengen je Zeiteinheit. Er fällt meist aus konvektiver Bewölkung (z. B. Cumulonimbuswolken). Starkregen kann überall auftreten und zu schnell ansteigenden Wasserständen und (bzw. oder) zu Überschwemmungen führen. Häufig geht Starkregen auch mit Bodenerosion einher. (Anm.: In der Warnstrategie wird zwischen Starkregen und Dauerregen unterschieden.) [...] Für die Planung und Dimensionierung von z. B. Stadtentwässerungsnetzen, Pumpwerken, Kläranlagen und Rückhaltebecken werden statistische Auswertungen zu Starkniederschlagsereignissen genutzt. Hier wird von Starkniederschlag gesprochen, wenn die Niederschlagshöhe einer bestimmten Zeiteinheit im statistischen Mittel am

betrachteten Ort nur einmal im Jahr oder seltener auftritt.“

Extreme Niederschlagsereignisse könnte man also als seltene Ereignisse hoher Intensität mit einem potenziell großen Impakt beschreiben. Es stellten sich daher 2 Fragen:

- Welche Schwellenwerte definieren ein Ereignis als extrem?
- Wo liegen die Grenzen zwischen 2 Ereignissen – sowohl räumlich als auch zeitlich gesehen?

In der zweistufigen Herleitung des Extremereigniskatalogs wird zwischen Objekten als Flächen extremen Niederschlags und Ereignissen als Auswahl der extremsten unabhängigen Objekte unterschieden. Die ausgewählten Objekte beschreiben dabei ein Ereignis in seiner extremsten Ausprägung über charakteristische Merkmale. Damit einher geht eine Informationsreduktion, die es ermöglicht, extreme Niederschlagsereignisse zu beschreiben und zu klassifizieren. Die grundlegenden Arbeiten zur Ableitung extremer Niederschlagsereignisse aus RADKLIM wurden bereits im GDV-Starkregenprojekt durchgeführt (LENGFELD, 2020) und im Rahmen von KlamEx weitergeführt.

4.1.1. Bestimmung extremer Niederschlagsobjekte

In der ersten Stufe der Katalogerstellung werden extreme Objekte definierter Dauerstufen ermittelt. Dabei wird noch keine Prüfung auf Unabhängigkeit durchgeführt – es können also mehrere Objekte verschiedener Dauerstufen zu einem meteorologischen Extremereignis gehören. Die Unabhängigkeitsprüfung erfolgt im Anschluss bei der Bestimmung der extremen Niederschlagsereignisse.

In einem ersten Schritt werden die RADKLIM-Daten zu verschiedenen Dauerstufen aufsummiert. Dabei werden im Rahmen der Katalogerstellung folgende Dauerstufen als gleitende Summen mit stündlichen Werten bestimmt: 1, 2, 3, 4, 6, 9, 12, 18, 24, 48 und 72 h. Anschließend werden für jede

Stunde und für jede Dauerstufe separat Niederschlagsobjekte detektiert. Als Niederschlagsobjekte gelten zusammenhängende Pixelflächen, deren einzelne Pixelwerte einen festgelegten Schwellenwert überschreiten. Als zusammenhängend gelten Pixel, die sich an den Längsseiten oder in einer Ecke berühren. Die Pixelflächen müssen eine Mindestgröße besitzen, die in Abhängigkeit der Dauerstufe festgelegt wurde. Durch diese Maßnahme soll verhindert werden, dass zum einen eventuell in den Daten vorhandene fehlerhafte Clutterstrukturen als Objekte erkannt und zum anderen großräumige Niederschlagsereignisse in einzelne Fragmente zerlegt werden. Als Schwellenwerte sind Daten geeignet, welche die Intensität des Niederschlags am Ort beschreiben. Im Rahmen von KlamEx wurden letztendlich 2 verschiedene Ansätze gewählt: 1.) die Überschreitung der Warnstufe 3 (W3) des DWD (s. Kapitel 3.4) und 2.) die Überschreitung des statistischen Niederschlags einer Wiederkehrzeit von 5 Jahren (T5; s. Kapitel 3.1.2). Beide Ansätze repräsentieren eine extreme Niederschlagsintensität. Während der Absolutwert des Niederschlags regional unabhängig ist, spiegeln die statistischen Niederschläge die klimatischen Bedingungen in Deutschland wider. Beide Kataloge haben ihre Berechtigung und wurden im Rahmen von KlamEx analysiert. Die angesetzten Mindestgrößen und Schwellenwerte sind in Tabelle 2 gelistet.

4.1.2. Bestimmung extremer Niederschlagsereignisse

Die detektierten extremen Niederschlagsobjekte werden in der zweiten Stufe auf ihre Unabhängigkeit geprüft. Dabei werden sowohl die zeitliche als auch die räumliche Unabhängigkeit betrachtet. Ziel ist es, ein für das jeweilige Ereignis repräsentatives Objekt zu selektieren, das die maximale Stärke des Ereignisses darstellt. Im Rahmen von KlamEx wurden verschiedene Parameter geprüft, um die Stärke eines Objekts zu beschreiben, z. B. die größte Wiederkehrzeit, die Fläche und die Extremität $E_{t,a}$ (s. Kapitel 3.5). Im Folgenden werden ausschließlich Ergebnisse des Rankings nach $E_{t,a}$ präsentiert, das über die Verknüpfung von Niederschlagsintensität und Fläche die Idee eines objektbasierten Ansatzes am besten widerspiegelt.

Ausgehend vom Objekt mit dem höchsten $E_{t,a}$ -Wert werden zuerst alle Objekte selektiert, die eine potenzielle zeitliche Abhängigkeit besitzen. Dies sind Objekte, die entweder zeitgleich oder in einem geringen zeitlichen Abstand am selben Ort erfasst wurden. Die Länge dieses minimal erlaubten Zeitraums zwischen 2 Objekten entspricht dabei der Dauerstufe des kürzeren Objekts, aber mindestens 4 Stunden. Die Definition erfolgte in Anlehnung an das DWA-A 531 (DWA, 2012), das die Grundlage der extremwertstatistischen Auswertung zur Bestimmung der statistischen Niederschläge darstellt. Alle somit detektierten zeitlich abhängigen Objekte werden anschließend auf ihre räumliche Abhängigkeit geprüft. Dabei gelten Objekte als räumlich abhängig, wenn ihre Schwerpunkte (des Niederschlags) eine geringere Distanz aufweisen als die Summe der effektiven Radien der zu vergleichenden Objekte. Ist dies der Fall, werden die zeitlich und räumlich abhängigen Objekte geringerer Extremität gelöscht. Das Objekt mit der höchsten Extremität wird als Ereignis in den Katalog übernommen. Auf diese Weise wurde wiederholt mit dem Datensatz verfahren, bis alle extremen Objekte geprüft und als Ereignisse selektiert waren. Die Ereignisse wurden abschließend auf Ausreißer geprüft und bei Vorliegen eines wahrscheinlichen Datenfehlers aus dem Katalog entfernt.

4.2. Die Verknüpfung mit Attributen

Alle Ereignisse des Katalogs sind mit einer Vielzahl an Attributen verknüpft. Die Attribute können in 3 verschiedene Klassen unterteilt werden. Die erste Klasse umfasst diejenigen Attribute, die direkte Eigenschaften des meteorologischen Ereignisses beschreiben, z. B. Extremität, Dauerstufe und Fläche. Die weiteren Klassen sind dagegen vom meteorologischen Ereignis selbst unabhängig. So umfasst die zweite Klasse meteorologische Parameter zum Zeitpunkt und am Ort des Ereignisses, beispielsweise die vorherrschende Temperatur sowie die objektive Wetterlage des Tages in Deutschland. In einer weiteren Attributklasse finden sich geografische Parameter des Ereignisortes, beispielsweise der Versiegelungsgrad und die Bevölkerungsdichte.

Die externen Attribute beziehen sich, soweit sie hochaufgelöst vorliegen, entweder auf die vom Ereignispolygon definierte Fläche oder auf den gewählten Referenzpunkt (Ort des maximalen Niederschlagswerts). Insgesamt umfassen die Ereigniskataloge derzeit jeweils 59 Hauptattribute. Die Attributtabelle stellt die Grundlage für eine automatisierte statistische Auswertung und Zusammenhangsanalyse dar. Darüber hinaus

ermöglichen sie ein einfaches Auswählen und Sortieren der Ereignisse nach gewählten Parametern. Die Liste der Attribute kann in Zukunft angepasst und erweitert werden. Abbildung 3 gibt einen Überblick über die enthaltenen meteorologischen und geografischen Attribute und ihre Quellen. Die vollständige Attributtabelle befindet sich im Anhang. Im Folgenden sind die Hauptattribute gelistet.

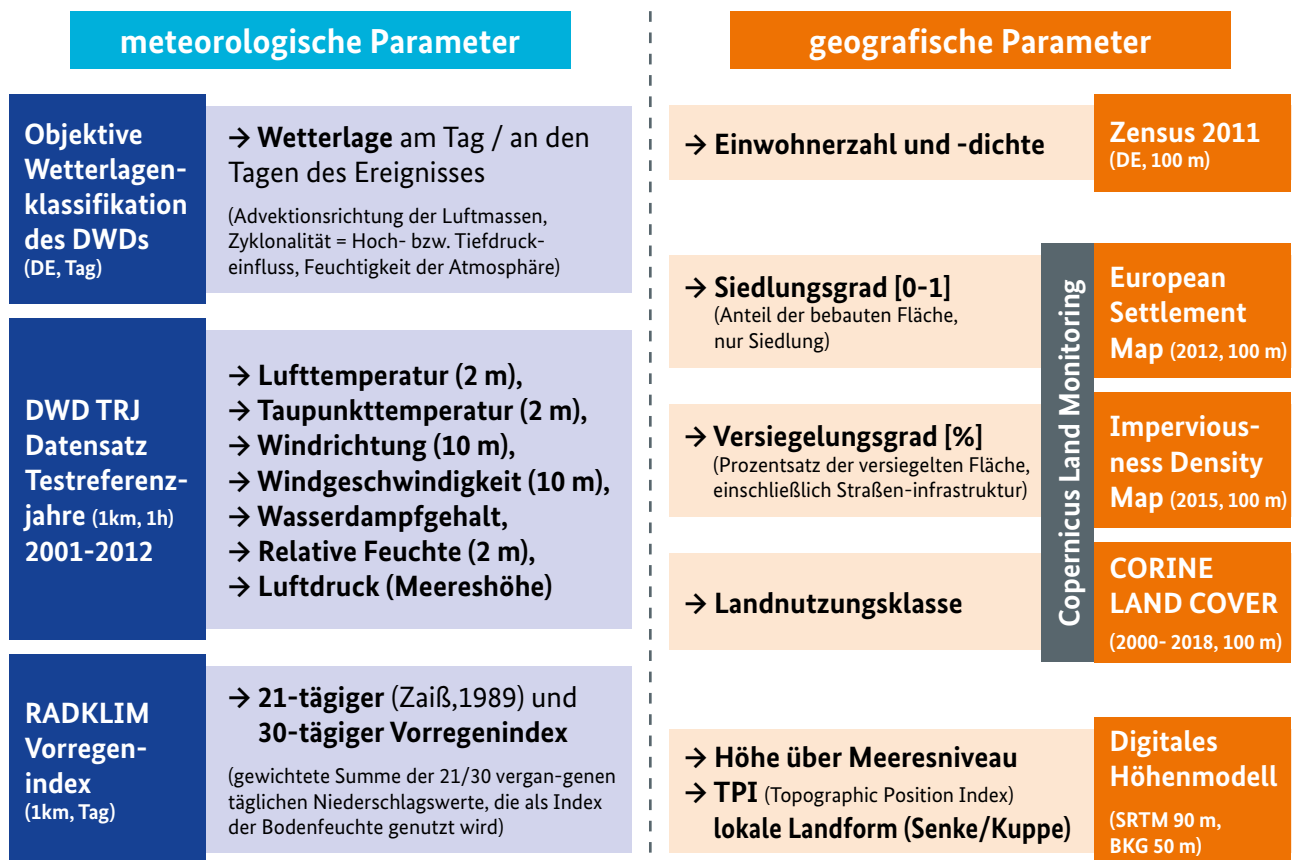


Abb. 3: Schematische Übersicht über die externen Attribute des Ereigniskatalogs.

Ereigniseigene Attribute

- Datum und Uhrzeit des Ereignisanfangs und des Ereignisendes [UTC]
- Signifikante Dauerstufe [h]
- Fläche [km², # Pixel]
- Koordinaten und Bundesland/Landkreis/Gemeinde und Postleitzahl vom Ort der maximalen Niederschlagssumme (RADKLIM-Projektion)
- Information, ob das Niederschlagsmaximum innerhalb Deutschlands liegt

- Anteil der Ereignisfläche [%], die in Deutschland liegt
- mittlerer und maximaler Niederschlag [mm]
- mittlere und maximale Wiederkehrzeit [a]
- mittlerer und maximaler Starkregenindex nach SCHMITT et al. (2018); Wertebereich [0,12]
- Extremität ($E_{T,A}$ bzw. ETA): Maß, das sowohl die Wiederkehrzeit (T) als auch die Fläche (A) eines Ereignisses betrachtet

Externe meteorologische Attribute

- Wetterlage am Tag des Ereignisanfangs und Ereignisendes (OWLK)
- 21-tägiger Vorregenindex nach ZAISS(1989)
- 30-tägiger Vorregenindex
- optional: Variablen aus TRJ-Daten für Ereignismaxima (2001-2012): Lufttemperatur (2 m), Taupunkttemperatur (2 m), Windrichtung und Windgeschwindigkeit (10 m), Wasserdampfgehalt, relative Feuchte (2 m) und Luftdruck (Meereshöhe)

Geografische Attribute

- Einwohnerzahl und Bevölkerungsdichte [km^{-2}]
- Siedlungsgrad [%]
- Versiegelungsgrad [%]
- Landnutzungsklasse
- Höhe [m] über Meeresebene
- TPI (Topographic Position Index) [m]

4.3. Vergleich der verschiedenen Kataloge

Wie in Kapitel 4.1 dargestellt, werden im Weiteren 2 Kataloge verfolgt: der Katalog W3_Eta (Objektdefinition nach Warnstufe 3 und Ereignisdefinition nach $E_{t,a}$) sowie der Katalog T5_Eta (Objektdefinition nach Wiederkehrzeit 5 a und Ereignisdefinition nach $E_{t,a}$), hier in den Versionen W3_Eta_2020.01 und T5_Eta_2020.01. Für die Verknüpfung mit den vorliegenden Einsatzdaten wurde der Katalog W3_Eta aufgrund der höheren Passgenauigkeit bevorzugt (vgl. Kapitel 6.2.1).

Aufgrund der unterschiedlichen Schwellenwerte ist zu erwarten, dass die räumliche Verteilung der Extremereignisse differiert. Abbildung 4 zeigt die räumliche Verteilung der extremen Niederschlagsereignisse aller Dauerstufen für die Jahre 2001 bis 2019 für die Kataloge W3_Eta und T5_Eta. Die schraffierten Flächen markieren dabei Regionen, in denen die Verfügbarkeit aussagekräftiger Niederschlagsdaten aufgrund der Lage oder längerer Ausfallzeiten der Radarsysteme in mehr als 7,5 % der Zeit nicht oder nur eingeschränkt gewährleistet ist. Die Ergebnisse in diesen Regionen sind aus diesem Grund nicht oder nur eingeschränkt belastbar. Die Abbildungen demonstrieren die unterschiedlichen Datengrundlagen. Der Katalog, der auf den absoluten Schwellenwerten der Warnstufen beruht, zeigt eine deutschlandweite Verteilung, die an die Topografie angelehnt ist und im Großen und Ganzen der Verteilung des Jahresniederschlags entspricht. Man sieht eine erhöhte Anzahl an Extremereignissen an den deutschen Mittelgebirgen und insbesondere im Alpenraum. Dies entspricht den Erwartungen, da die Niederschläge in diesen Regionen in der Regel kräftiger ausfallen als in der norddeutschen Tiefebene. Die Objektdefinition nach absoluten Warnschwellen spiegelt somit die klimatologischen Gegebenheiten in Deutschland wider. Der Katalog, der Schwellenwerte auf Basis der Wiederkehrzeiten verwendet, berücksichtigt diese klimatologische Verteilung bereits bei der Objektdefinition. Die räumliche Verteilung der extremen Niederschlagsereignisse ist daher erwartungsgemäß – auch bereits über den kurzen Zeitraum von 19 Jahren – deutschlandweit relativ gleichmäßig.

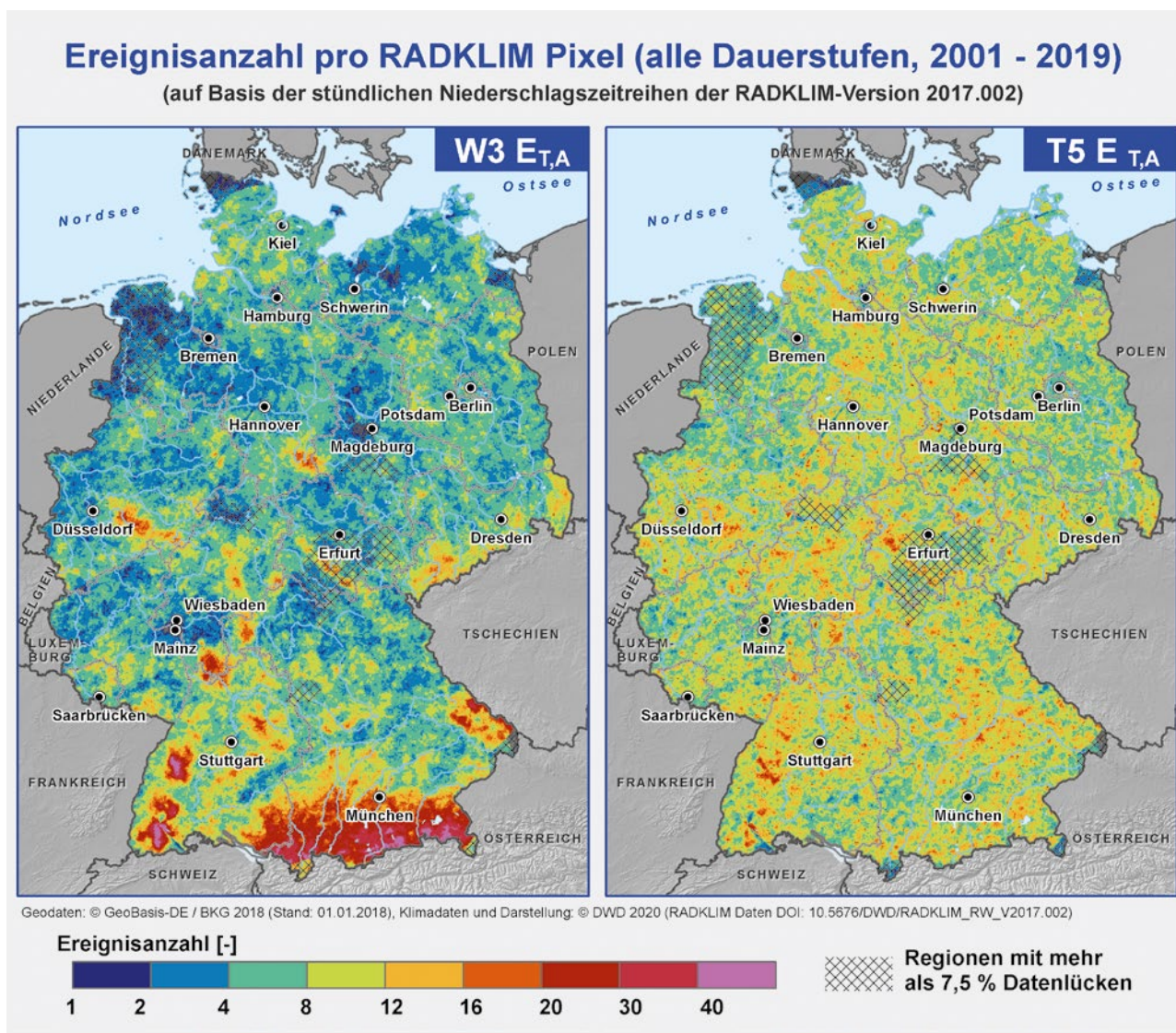


Abb. 4: Anzahlen extremer Niederschlagsereignisse pro RADKLIM-Pixel in Deutschland für die Jahre 2001 bis 2019. Dargestellt sind die Ereignisse aller Dauerstufen des Katalogs nach Warnstufe 3 und Extremität (links) sowie des Katalogs nach fünfjähriger Wiederkehrzeit und Extremität (rechts). Während die Selektion nach Warnstufe 3 die Niederschlagsklimatologie widerspiegelt, sind die Ereignisse nach Wiederkehrzeit 5 a relativ gleich verteilt. Die schraffierten Flächen markieren Regionen mit mehr als 7,5 % Datenlücken in den zugrundeliegenden RADKLIM-Daten.

Abbildung 5 zeigt die Unterschiede zwischen den Schwellenwerten der beiden verwendeten Hauptkataloge – den Niederschlagswerten der Warnstufe 3 und den statistischen Niederschlägen mit einer Wiederkehrzeit von 5 Jahren – für die 11 im Rahmen von KlamEx betrachteten Dauerstufen. Dargestellt ist die absolute Differenz der Niederschlagsschwellenwerte: Negative Werte (blau) illustrieren einen höheren Schwellenwert der Warnstufe; positive Werte (rot) zeigen an, dass der statistische Niederschlagswert größer ist als der Wert der zugehörigen Warnstufe. Für die Dauerstufe von einer Stunde liegen die statisti-

schen Niederschläge für weite Teile Deutschlands unterhalb des Warnstufenwerts. Mit Zunahme der Dauerstufe zeichnet sich die Topografie Deutschlands deutlicher durch positive Werte ab. Dieses Verhalten ist dadurch begründet, dass die statistische Häufigkeit extremer Dauerregen – einhergehend mit den Werten der statistischen Niederschläge – in den Höhenlagen in der Regel größer ist als im Flachland. Zusätzlich zeichnet sich das Bundesland Schleswig-Holstein durch höhere Werte des statistischen Niederschlags aus. Bei einer Dauerstufe von 72 Stunden liegt der Wert der Warnstufe mit Ausnahme des Brockens

sowie der höchsten Punkte des Schwarzwalds und der Alpen deutlich oberhalb des Wertes des statistischen Niederschlags. Während die Werte der Warnschwellen über einen Großteil der Dauerstufen die Klimatologie abbilden, sind die Warnschwellen für die Dauerstufen von einer

sowie insbesondere 72 Stunden im Vergleich zu den statistischen Niederschlägen höher angesetzt, was Auswirkungen auf die charakteristischen Dauerstufen der Ereignisse hat, wie im folgenden Vergleich deutlich wird.

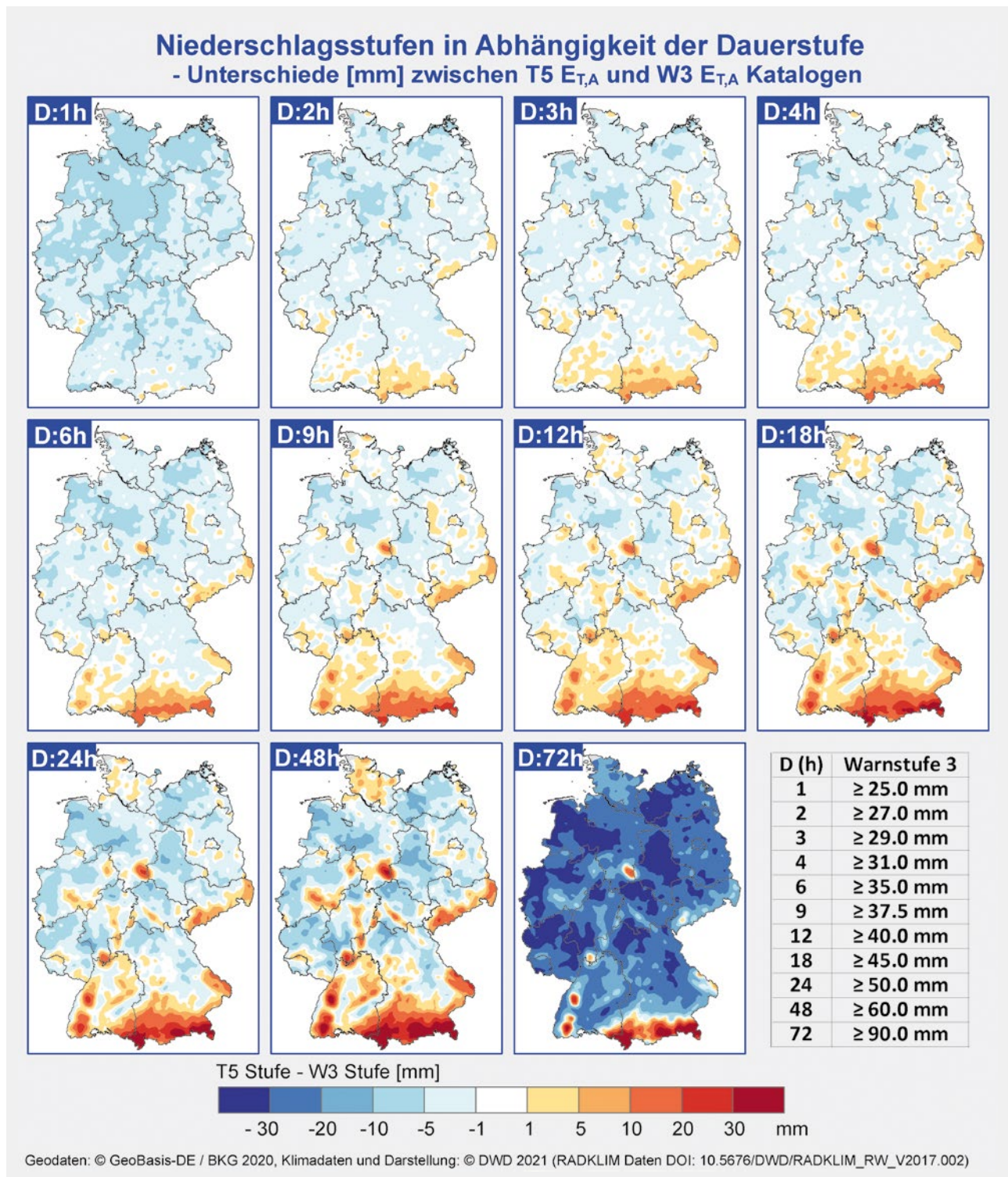


Abb. 5: Differenz der Niederschlagsschwellenwerte der Kataloge nach statistischem Niederschlag mit einer Wiederkehrzeit von 5 Jahren (T5) und nach Warnstufe 3 (W3).

Abbildungen 6 bis 9 zeigen zeitliche Statistiken der Ereignisanzahl und -fläche für die beiden Kataloge W3_Eta und T5_Eta. Trotz der unterschiedlichen räumlichen Statistik verhalten sich die zeitlichen Statistiken für beide Kataloge sehr ähnlich. Katalog T5_Eta weist in der Regel höhere Absolutwerte auf. Insbesondere die Ereignisse der höchsten Dauerstufe sind stärker vertreten. Ein Grund dafür liegt in den verhältnismäßig hohen

Schwellenwerten der Warnstufen für 72-stündige Ereignisse. Darüber hinaus scheinen Ereignisse, die in W3_Eta als großräumigeres Ereignis längerer Dauerstufe enthalten sind, im Katalog T5_Eta teilweise in Form mehrerer kleinräumiger Ereignisse kurzer Dauerstufe abgebildet zu werden, sodass folglich auch Ereignisse kleiner Dauerstufe zahlreicher vertreten sind. Dieses Phänomen konnte in Einzelfällen beobachtet werden.

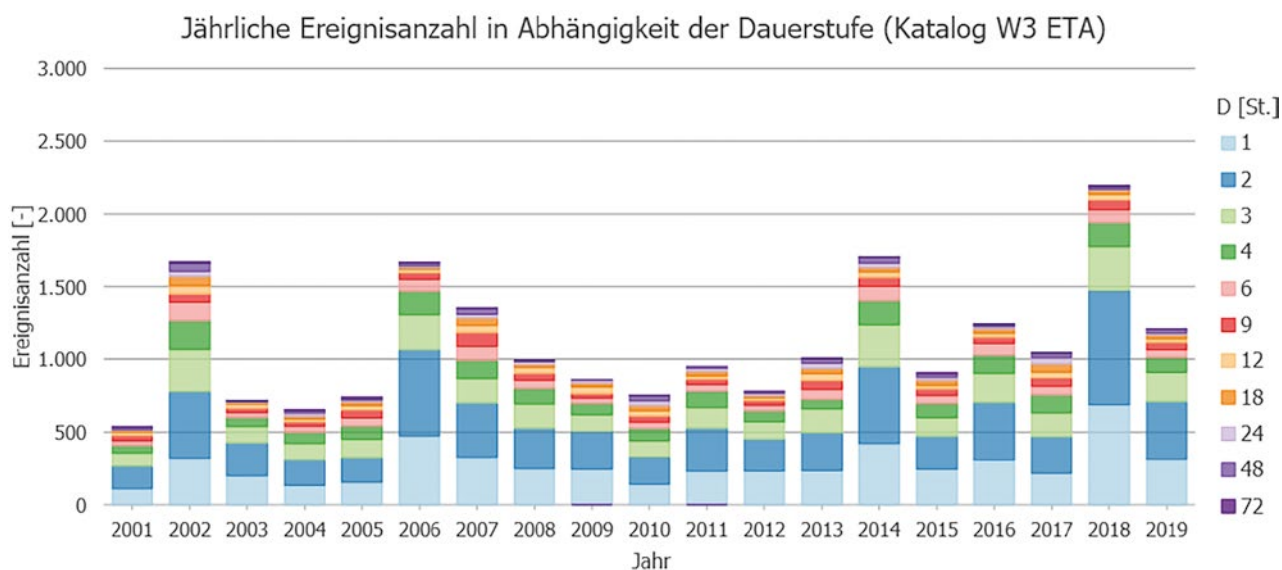


Abb. 6: Jährliche Anzahl extremer Niederschlagsereignisse in Deutschland zwischen 2001 und 2019 nach Katalog W3_Eta. Die unterschiedlichen Farben markieren die charakteristischen Dauerstufen der Ereignisse. Die Anzahlen werden von Ereignissen kurzer Dauerstufe dominiert. Die größte Anzahl an Ereignissen wurde mit mehr als 2000 Ereignissen für das Jahr 2018 ermittelt.

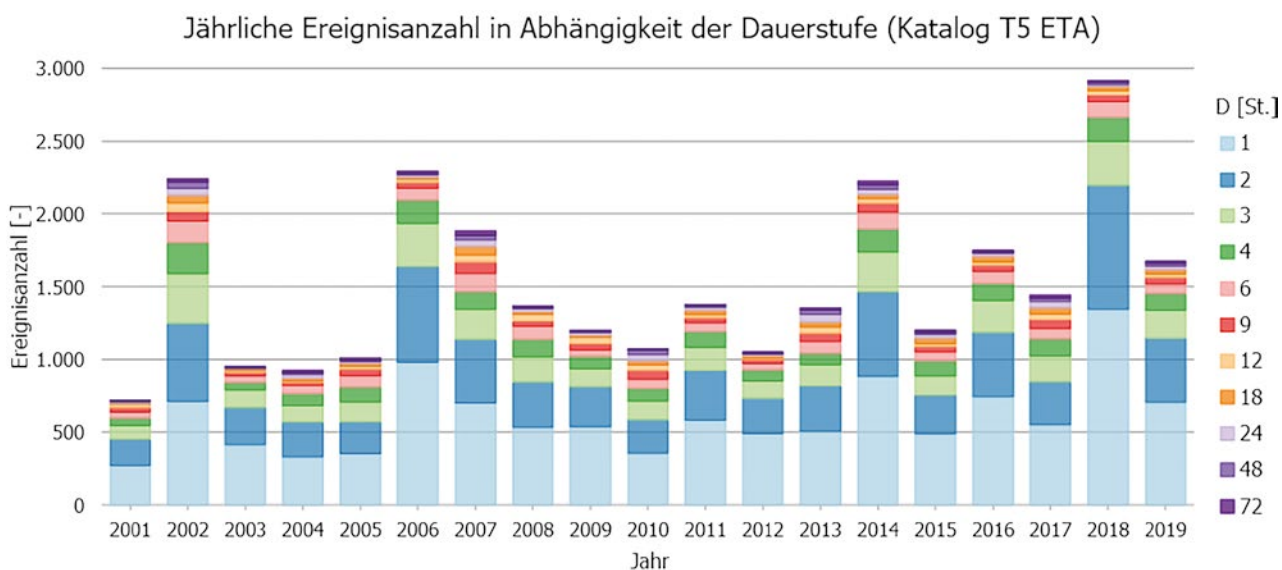


Abb. 7: wie Abbildung 6, aber für den Katalog T5_Eta.

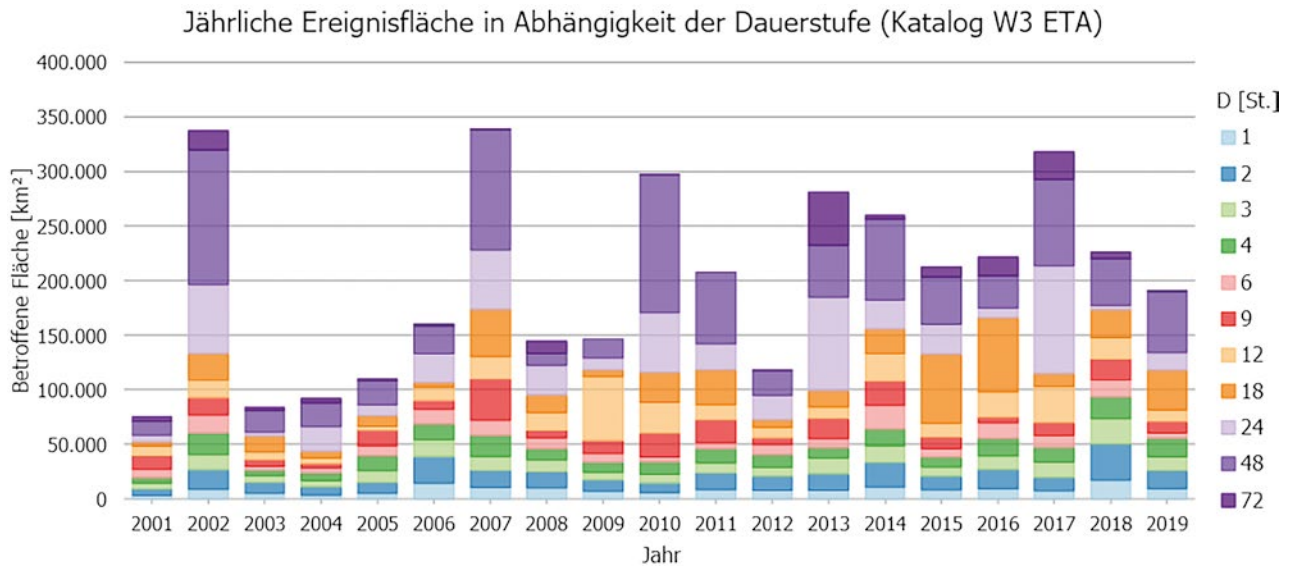


Abb. 8: Jährliche Gesamtfläche extremer Niederschlagsereignisse in Deutschland zwischen 2001 und 2019 für den Katalog W3_Eta. Die unterschiedlichen Farben markieren die charakteristischen Dauerstufen der Ereignisse. Die Flächen werden von Ereignissen langer Dauerstufe dominiert. Die größten Ereignisflächen wurden für die Jahre 2002 und 2007 ermittelt.

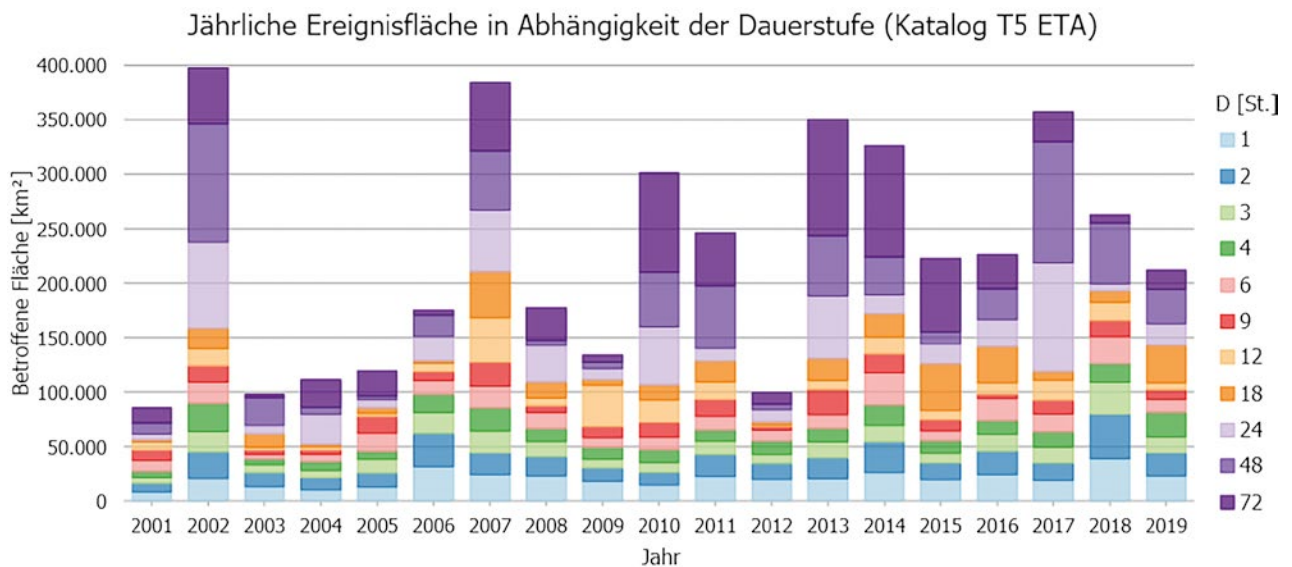


Abb. 9: wie Abbildung 8, aber für den Katalog T5_Eta.

Welcher Katalog verwendet werden sollte, ist sicher auch eine Frage der Anwendung. Es ist zu vermuten, dass kurzfristige intensive Niederschläge eher unabhängig von der Infrastruktur lokale Überschwemmungen bedingen können, während bei länger anhaltenden Starkniederschlägen eine Ausrichtung der Infrastruktur an den Bemessungswerten durchaus ausschlaggebend

sein sollte. Für die weiteren umfangreichen Untersuchungen liegt der Katalog W3_Eta zugrunde, der im Rahmen von KlamEx als Hauptkatalog definiert wurde. Die Gründe für diese Wahl sind, dass zum einen durch das jährliche Update der statistischen Niederschläge aus RADKLIM für den Katalog T5_Eta größere Änderungen zu erwarten sind als für W3_Eta. Des Weiteren ist die Verwendung

absoluter Schwellenwerte einfacher zu kommunizieren, sie bildet die klimatologischen Unterschiede in Deutschland direkt ab. Nichtsdestotrotz stellt der Ereigniskatalog T5_Eta eine wichtige Alternative dar, insbesondere für Regionen, in denen die deutschlandweit geltenden Warnschwellen häufig überschritten werden, z. B. im Alpenraum, und daher die Ereignisdetektion nach W3_Eta sehr viele Ereignisse hervorbringt.

4.4. Technische Umsetzung und Datenformate

4.4.1. Die Ereignisdetektion (Python)

Die Softwareprogramme zur Detektion der Ereignisse in den RADKLIM-Niederschlagsdaten wurden in der Programmiersprache Python erstellt. Die grundlegende Entwicklung fand im Rahmen des Projektes GDV-Starkregen (LENGFELD, 2020) statt. In Zusammenarbeit mit dem KlamEx-Projekt wurde die Software weiterentwickelt, geprüft und getestet. Das Ergebnis ist ein Ereigniskatalog im CSV-Format, der die ereigniseigenen Attribute sowie Informationen zur Geolokation enthält.

4.4.2. Der Ereigniskatalog in ArcGIS

Die CSV-Datei aus Kapitel 4.4.1 diente als Input für die Erstellung des vollständigen Katalogs in ArcGIS. Hierzu wurden die Ereignisse über den

Referenzpunkt (maximaler Niederschlagswert) und das die Ereignisfläche einhüllende Polygon als Shape (SHP)-Dateien charakterisiert. Die Information über die charakteristische Ereignisfläche wurde den RW-Daten aus RADKLIM für die jeweilige charakteristische Dauerstufe und Zeit entnommen. Den jeweiligen SHP-Dateien wurde anschließend eine Vielzahl an Attributen zugeordnet.

Die Ereigniskataloge sind umfassend dokumentiert. Die Bearbeitung im Rahmen des Projektes erfolgte unter Erstellung zahlreicher GIS-Tools, die teilweise in Form einer ArcGIS-Toolbox den Projektpartnern zur Verfügung stehen. Die KlamEx-ArcGIS-Toolbox (ArcMap 10.6.1, Python 2.7.14) beinhaltet 4 Werkzeuggruppen, die größtenteils im Model Builder oder alternativ als Pythonskript erstellt wurden. Die Namen der Werkzeuge (Tools) werden hier auf Englisch wiedergegeben (Abbildung 10).

- *K1A Prepare Regional Catalogues (points + zones)*
- *K1B Calculate Intersection Areas (e.g. event areas within the city)*

Mit diesen Tools kann auf 2 Arten eine regionale Version des Katalogs erstellt werden (K1A): als Point Feature Layer (Ereignismaxima) und Polygon Feature Layer (Ereigniszonen).

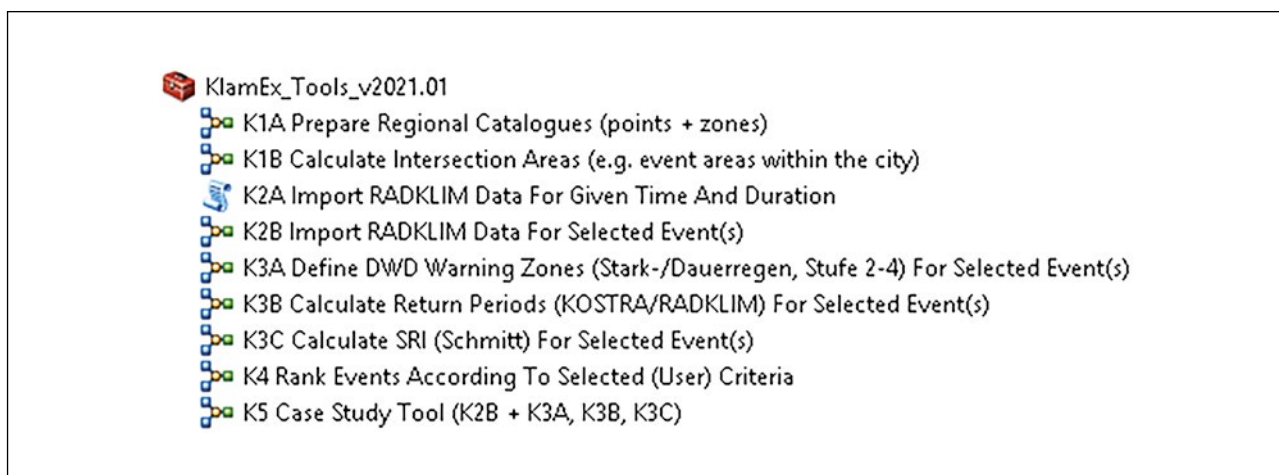


Abb. 10: Screenshot der KlamEx-Toolbox in ArcGIS.

Das Tool kann ebenso angewendet werden, um Schnittflächen zwischen Stadt/Kreis/Gemeinde und den katalogisierten Ereignissen zu bestimmen und folgende Fragen zu beantworten: Wie viele Ereignisse betrafen die vorgegebene Fläche, und wie groß war die Schnittfläche (K1B)? Zusätzliche Eigenschaften (z. B. Dauerstufe, Fläche oder Zeitpunkt) können über eine SQL-Abfrage (SQL definition query) vor der Nutzung des Tools ermittelt werden.

- *K2A Import RADKLIM Data For Given Time And Duration*
- *K2B Import RADKLIM Data For Selected Event(s)*

Für ein Datum und eine Zeit (K2A) oder für ein ausgewähltes Ereignis oder mehrere Ereignisse des Ereigniskatalogs (K2B) von Interesse können die zugehörigen RADKLIM-Niederschlagssummen (RW) vom DWD-OpenData-Server heruntergeladen werden.

- *K3A Define DWD Warning Zones (Stark-/ Dauerregen, Stufe 2-4) For Selected Event(s)*
- *K3B Calculate Return Periods (KOSTRA/ RADKLIM) For Selected Event(s)*
- *K3C Calculate SRI (Schmitt) For Selected Event(s)*

Erstellt RADKLIM-basierte (1 km x 1 km) Ereignischarakteristiken für ausgewählte Ereignisse: Warnregionen nach DWD-Warnstufen (K3A), Wiederkehrzeiten nach KOSTRA oder RADKLIM (K3B), Starkregenindex (SRI, KC3).

K4 Rank Events According To Selected (User) Criteria

Generiert ein separates RANKING Feature Layer vom Ereigniskatalog (Punkte oder Zonen). Die Ränge können entsprechend einem ausgewählten Attribut hinzugefügt werden. Zusätzliche Kriterien können in Form einer SQL-Anfrage (SQL Definition Query) ergänzt werden. Ebenso gibt es die Möglichkeit, die Anzahl der Ereignisse im Ranking-Layer zu wählen (z. B. TOP 100).

- *K5 Case Study Tool (K2B + K3A, K3B, K3C)*

Für ausgewählte Ereignisse werden die RADKLIM-Daten heruntergeladen und verschiedene Ereignischarakteristika auf dem 1-km-x-1-km-Raster berechnet (Niederschlagssummen, Warnzonen, Wiederkehrzeiten, SRI).

Alle Tools können von den Nutzerinnen und Nutzern weiterentwickelt oder mit anderen ArcGIS-Tools kombiniert werden.

4.4.3. Der Ereigniskatalog als Online-Dashboard

Ausgewählte Ereigniskataloge können über eine webbasierte ArcGIS-Realisierung getestet werden. Das Online-Dashboard enthält eine interaktive Kartendarstellung, ausgewählte Schlüsselinformationen zu den Ereignissen sowie Histogrammdarstellungen einzelner Statistiken. Das Dashboard ist aktuell unter der Adresse <https://arcgis.is/1HDqH5> zu erreichen. Es wird darauf hingewiesen, dass es sich hierbei nicht um ein offizielles Produkt des DWD handelt, sondern lediglich um

eine Arbeitsunterstützung im Rahmen des Projekts KlamEx. Insbesondere sei darauf hingewiesen, dass die angegebenen Wiederkehrzeiten rein mathematisch auf Basis von RADKLIM hergeleitet wurden und insbesondere für Wiederkehrzeiten oberhalb von 100 Jahren keine belastbaren Daten darstellen. Eine Pflege des Dashboards ist nach Ablauf der Projektlaufzeit nicht gewährleistet.

Abbildung 11 fasst die Arbeitsschritte zur Erstellung des Ereigniskatalogs im Rahmen von ArcGIS schematisch zusammen.

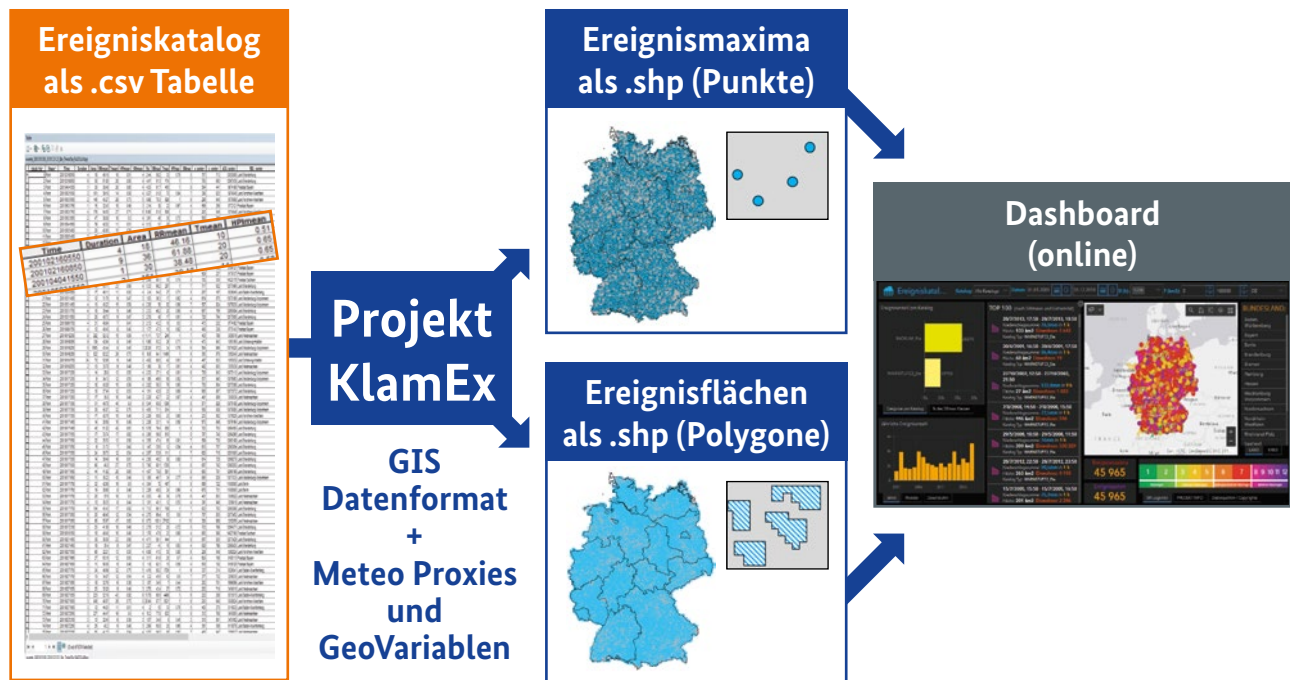


Abb. 11: Schematische Darstellung der technischen Formate der Ereigniskataloge in den verschiedenen Entwicklungsschritten.



5.

Kapitel

Quelle: Pixabay/PublicDomainPictures

Der Ereigniskatalog – Ergebnisse und Analysen

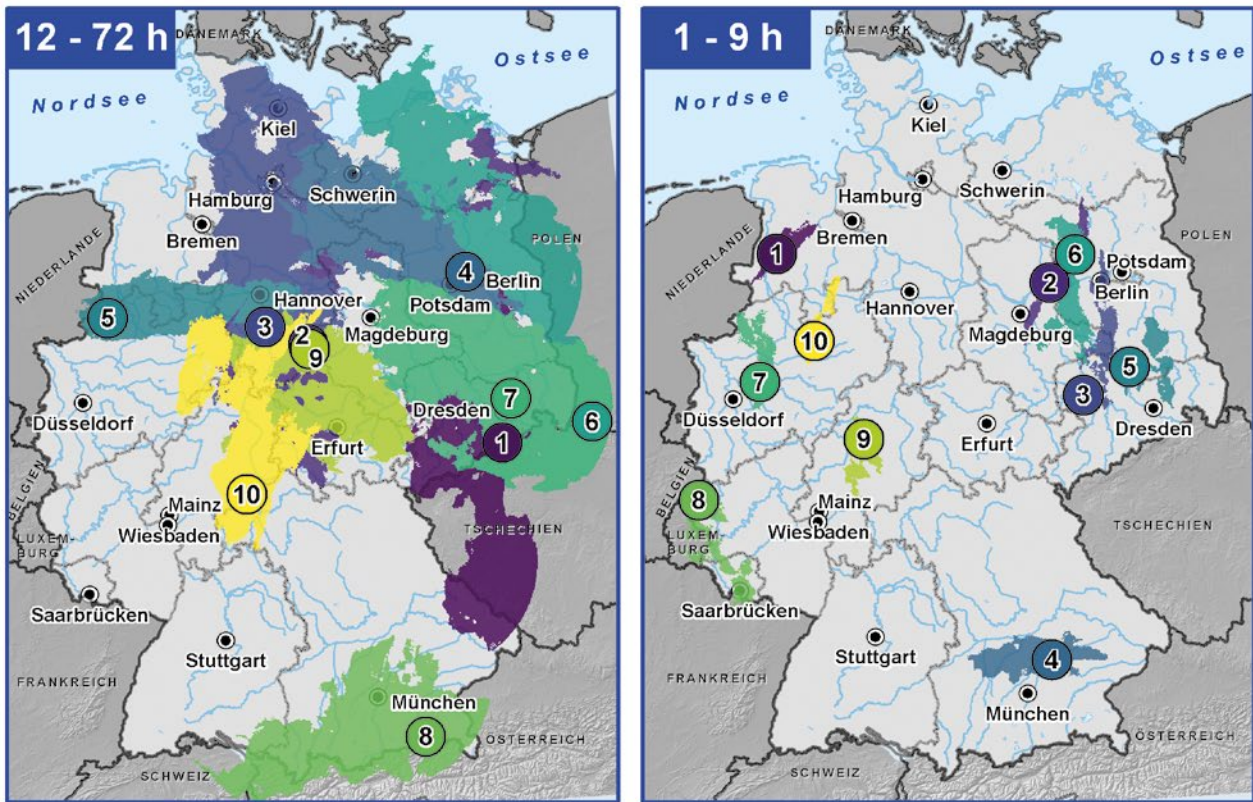
Der Ereigniskatalog mit seinen umfangreichen Attributen ermöglicht eine Vielzahl statistischer Auswertungen nach unterschiedlichen Kriterien. In diesem Kapitel werden ausgewählte Ergebnisse präsentiert, die unterschiedliche Aspekte des Katalogs ansprechen. In Kapitel 5.1 erfolgt ein Ranking der Extremereignisse. Kapitel 5.2 präsentiert räumliche und zeitliche Statistiken. In Kapitel 5.3 werden die Ergebnisse der Zusammenhangsanalysen präsentiert. Dabei wird insbesondere der Fragestellung nachgegangen, ob bevorzugte Gebiete für das Auftreten von Extremniederschlägen detektierbar sind. Die Untersuchungen zum Clausius-Clapeyron-Effekt adressieren die Frage nach einer potenziellen Zunahme der Extremität der Starkniederschlagsereignisse im Rahmen des Klimawandels. Die Untersuchungen in diesem Kapitel erfolgen dabei ohne Berücksichtigung von Einsatzdaten, die in Kapitel 7 hinzugezogen werden.

5.1. Ranking

Der Aufbau des Ereigniskatalogs ermöglicht sowohl die Auswahl der Ereignisse nach bestimmten Kriterien, z. B. geografischen Regionen, als auch ein Ranking nach verschiedenen Attributen. Abbildung 12 zeigt die Ereignisflächen der extremsten Niederschlagsereignisse zwischen 2001 und 2019 in Deutschland, geordnet nach der Ereignisextremität $E_{t,a}$. Dabei zeigt die linke Karte

die 10 extremsten Ereignisse mit einer charakteristischen Dauerstufe von mindestens 12 Stunden (Dauerregen), während die rechte Karte die entsprechende TOP 10 für geringere Dauerstufen (Starkregen) zwischen einer und 9 Stunden darstellt. Eine Unterscheidung zwischen kurzen und langen Dauerstufen ist sinnvoll, da die Extremität stark von der Fläche abhängt, die für Ereignisse längerer Dauerstufe im Mittel deutlich größer ist und daher diese Ereignisse leicht überbewertet scheinen. Die Trennung zwischen Dauer- und Starkregen bei einer Dauerstufe zwischen 9 und 12 Stunden entspricht dabei den Ergebnissen aus LENGFELD et al. (2020) und korrespondiert auch mit den Warnschwellendefinitionen des DWD, die eine Grenze zwischen 6 und 12 Stunden ansetzen. In das Ranking gehen ausschließlich Ereignisse ein, deren im Radarverbund detektierte Fläche zu mehr als 50 % innerhalb Deutschlands liegt. In Einzelfällen kann es aufgrund des begrenzten Messbereichs vorkommen, dass Ereignisse nicht vollständig erfasst werden. Dies ist z. B. beim Elbehochwasser 2002 auslösenden Dauerregenereignis 1 der Fall, das sich zusätzlich über weite Teile Tschechiens erstreckte. Trotz dieser Einschränkung besitzt dieses Ereignis die höchste Extremität. Die Tabellen in Abbildung 12 listen entsprechend die 10 extremsten Dauer- sowie Starkregenereignisse inklusive ausgewählter Attribute auf.

TOP 10 Ereignisse 2001 - 2019 (nach Extremität, W3E_{T,A}Katalog)



Dauerregen - Ereignisse (12 - 72 Std.)

RANK	Date_START	D [h]	Area	Eta	RRmax	RRmean	SRI _{max}	SRI _{mean}	BDL/LKS/GMD_RRmax	Wetterlage Start/End
1	12.08.2002 02:50	24	48420	265	283.1	86.89	12	6	SN /Sächsische Schweiz-Osterzgebirge /Altenberg	NWAZF/NWAAF
2	24.07.2017 07:50	48	54898	223	255.8	85.04	10	5	NI /Goslar /Bad Harzburg	XXZZF/NWAZF
3	17.07.2002 02:50	48	44805	212	187.2	85.34	10	6	NI /Hildesheim /Sibbesse	XXZZF/XXAZT
4	29.06.2017 09:50	24	33284	197	182.4	72.41	10	6	BE /Berlin /Berlin	XXZZF/SWZZF
5	26.08.2010 04:50	24	14519	173	163.9	86.16	11	7	NW /Borken /Schöppingen	SWZAF/NWZZF
6	21.07.2011 05:50	48	37879	171	187.2	82.44	10	5	Tschechien	XXAZF/SWAZT
7	25.09.2010 21:50	48	45655	162	154.5	79.38	9	5	SN /Bautzen /Wachau	XXZZF
8	30.05.2013 17:50	72	32937	146	319.5	131.95	9	5	BY /Rosenheim /Aschau i. Chiemgau	XXAZT/NWAAAT
9	27.09.2007 12:50	48	26330	133	189.5	78.56	10	5	ST /Harz /Wernigerode	SOZZF/SWZZT
10	20.05.2019 12:50	18	22325	123	106.7	60.21	9	5	HE /Main-Kinzig-Kreis /Steinau an der Straße	XXZZF

Starkregen - Ereignisse (1 - 9 Std.)

RANK	Date_START	D [h]	Area	Eta	RRmax	RRmean	SRI _{max}	SRI _{mean}	BDL/LKS/GMD_RRmax	Wetterlage Start/End
1	23.06.2016 17:50	6	1501	64.1	166	61.83	12	7	NI /Emsland /Groß Berßen	SWAAF
2	01.08.2018 21:50	9	2649	61.5	155.3	63.65	11	6	ST /Jerichower Land /Genthin	XXAAF
3	11.06.2019 17:50	4	3231	58.1	216.1	46.74	12	5	SN /Leipzig /Parthenstein	SWZAF
4	21.07.2014 15:50	6	5360	57.6	74.2	45.61	9	5	BY /Freising /Wang	XXZZF
5	05.07.2012 13:50	6	2775	54.1	140.6	50.18	11	6	BB /Elbe-Elster /Bad Liebenwerda	SWZZF
6	21.07.2007 23:50	9	5289	52.4	105.4	48.58	9	4	BB /Havelland /Wiesenaue	SWAAF/SWAZF
7	20.06.2013 10:50	3	2460	51.5	99.6	41.38	11	6	NW /Bochum /Bochum	SWZAF
8	31.05.2018 20:50	9	3839	50.7	106.9	47.69	10	5	RP /Eifelkreis Bitburg-Prüm /Habscheid	SOZAF/XXZZF
9	30.05.2008 16:50	2	2154	49.9	97.6	42.38	10	6	HE /Marburg-Biedenkopf /Kirchhain	SOZAF
10	10.08.2015 17:50	6	1138	49	116	57.37	11	7	NW /Warendorf /Oelde	XXZAF

FELDERBESCHREIBUNG: Date_START - Anfangszeitpunkt des Ereignisses in UTC; D [h] - Signifikante Dauerstufe [h]; Area - Gesamtfläche [km²] (nach RADOLAN Projektion); Eta - Extremität; RRmax/RRmean - Maximaler/Mittlerer Niederschlag [mm]; SRI_{max}/SRI_{mean} - Maximaler/Mittlerer Starkregenindex nach Schmitt (Wertebereich [0,12]); BDL/ LKS/GMD_RRmax - Bundesland/ Landkreis/ Gemeinde des Niederschlagsmaximums; Wetterlage Start/End - Wetterlage nach OWLK des DWD

Klimadaten und Darstellung: © DWD 2021 (CatRaRE Daten DOI: https://doi.org/10.5676/DWD/CatRaRE_W3_ETA_V2021.01); Geodaten: © GeoBasis-DE/BKG 2020 (Stand: 01.01.2020).

Abb. 12: Die 10 extremsten Niederschlagsereignisse langer (links) und kurzer (rechts) Dauerstufen von 2001 bis 2019 in Deutschland. Die Farb-codierung dient der Markierung der jeweiligen Ereignisflächen. Die Tabellen listen die Hauptattribute der Ereignisse auf.

Ereignisfläche in der Stadt > = 1 km ² , Maxima innerhalb +500 m	Stadt (>200 000 Einwohner)	HiOS	RANG			W3Eta RANKING			T5Eta RANKING		
			Einwohnerzahl	Stadtfläche (UTM)	Stadtfläche (RDL)	Ereigniszonen	Fläche (RDL)	Ereignismaxima	Ereigniszonen	Fläche (RDL)	Ereignismaxima
	Berlin	1	1	1	1	2	2	1	2	1	1
	München, Kreisfreie Stadt	2	3	6	5	1	1	2	6	6	6
	Hamburg	3	2	2	2	3	3	3	1	2	3
	Dresden, Kreisfreie Stadt	6	12	4	4	8	4	4	8	4	4
	Leipzig, Kreisfreie Stadt		8	8	8	6	5	5	9	5	8
	Stuttgart, Stadtkreis	10	6	18	16	5	7	9	12	19	14
	Düsseldorf, Kreisfreie Stadt	9	7	15	15	29	26	32	13	11	23
	Leipzig, Kreisfreie Stadt		8	8	8	6	5	5	9	5	8
	Köln, Kreisfreie Stadt	8	4	3	3	7	6	6	3	3	3
	Chemnitz, Kreisfreie Stadt		30	14	14	9	8	7	13	16	9
	Essen, Kreisfreie Stadt		10	17	17	10	17	7	7	9	9
	Stuttgart, Stadtkreis	10	6	18	16	5	7	9	12	19	14
	Erfurt, Kreisfreie Stadt		37	10	10	11	12	9	9	7	11
	Frankfurt am Main, Kreisfreie Stadt	4	5	12	12	16	25	11	5	18	7
	Münster, Kreisfreie Stadt		20	7	7	13	11	12	20	10	16
	Karlsruhe, Stadtkreis		21	25	24	16	10	12	17	17	11
	Bremen, Kreisfreie Stadt		11	5	6	20	23	12	4	8	5
	Dortmund, Kreisfreie Stadt		9	9	9	14	16	15	20	15	18
	Wiesbaden, Kreisfreie Stadt		24	20	18	22	37	15	11	22	11
	Mannheim, Stadtkreis		22	31	31	16	19	17	32	31	30
	Freiburg im Breisgau, Stadtkreis		33	29	29	4	9	18	13	27	20
	Nürnberg, Kreisfreie Stadt	5	14	23	22	19	18	18	23	24	18

Tab. 4: Ranking der deutschen Großstädte mit einer Einwohnerzahl > 200.000 entsprechend der Betroffenheit durch Extremereignisse (geordnet nach Anzahl der Ereignismaxima nach Katalog W3_Eta_2020.01 und T5_Eta_2020.01; zum Vergleich das Ranking pluvialer Hochwasserereignisse des Katalogs aus KAISER et al. (2021) bis 2017 (HiOS).

Ereignisfläche in der Stadt > = 1 km ² , Maxima innerhalb +500 m		RANG			W3Eta RANKING			T5Eta RANKING		
		Einwohnerzahl	Stadtfläche (UTM)	Stadtfläche (RDL)	Ereigniszonen	Fläche (RDL)	Ereignismaxima	Ereigniszonen	Fläche (RDL)	Ereignismaxima
Stadt (>200 000 Einwohner)	HiOS									
Halle (Saale), Kreisfreie Stadt		31	35	35	25	32	18	37	32	31
Magdeburg, Kreisfreie Stadt		32	21	21	26	31	21	34	21	25
Wuppertal, Kreisfreie Stadt		17	27	27	12	13	22	24	12	25
Bielefeld, Kreisfreie Stadt		18	11	11	20	15	22	18	13	21
Duisburg, Kreisfreie Stadt		15	13	13	27	24	22	18	14	21
Bonn, Kreisfreie Stadt		19	33	33	23	21	25	30	28	24
Krefeld, Kreisfreie Stadt		34	34	34	27	35	25	26	35	33
Mönchengladbach, Kreisfreie Stadt		25	26	26	32	30	25	16	20	16
Braunschweig, Kreisfreie Stadt		27	22	23	33	22	28	40	29	37
Gelsenkirchen, Kreisfreie Stadt		26	37	37	33	36	28	35	36	33
Kassel, Kreisfreie Stadt		40	38	38	33	38	28	26	39	28
Hannover		13	19	20	37	28	28	20	23	15
Aachen	6	28	28	28	29	33	32	29	30	28
Düsseldorf, Kreisfreie Stadt	9	7	15	15	29	26	32	13	11	23
Lübeck, Kreisfreie Stadt		36	16	19	29	20	32	30	26	37
Oberhausen, Kreisfreie Stadt		38	40	40	36	39	35	38	40	39
Rostock, Kreisfreie Stadt		39	24	25	38	29	35	35	25	25
Mainz, Kreisfreie Stadt		35	39	39	40	40	35	32	38	36
Augsburg, Kreisfreie Stadt		23	30	30	14	14	38	28	33	33
Bochum, Kreisfreie Stadt		16	32	32	24	27	38	25	34	31
Kiel, Kreisfreie Stadt		29	36	36	38	34	40	38	37	39

Fortsetzung Tab. 4: Ranking der deutschen Großstädte mit einer Einwohnerzahl > 200.000 entsprechend der Betroffenheit durch Extremereignisse (geordnet nach Anzahl der Ereignismaxima nach Katalog W3_Eta_2020.01 und T5_Eta_2020.01; zum Vergleich das Ranking pluviabler Hochwasserereignisse des Katalogs aus KAISER et al. (2021) bis 2017 (HiOS).

5.1.1. Ranking der durch Extremereignisse betroffenen Großstädte

Tabelle 4 zeigt das Ranking der durch extreme Niederschlagsereignisse betroffenen deutschen Großstädte mit einer Einwohnerzahl > 200.000. Die Ränge wurden entsprechend der Anzahl der Ereignismaxima (Niederschlagsmaxima) innerhalb der Stadtgebiete, der Anzahl der Ereignisflächen, welche die Stadtfläche schneiden, sowie der betroffenen Gesamtfläche aller Ereignisse im Stadtgebiet für die Kataloge W3_Eta_2020.01 und T5_Eta_2020.01 bestimmt. Die Tabelle listet die betroffenen Städte entsprechend den Ereignismaxima in Katalog W3_Eta. Zusätzlich zur Stadtfläche in der RADOLAN-Projektion (RDL) ist die reale Fläche (UTM) angegeben. Die Betroffenheit der Städte ist stark mit der Größe der Stadtfläche korreliert, wobei größere Flächen die Wahrscheinlichkeit erhöhen, von einem Ereignis getroffen zu werden. Ein ursächlicher Zusammenhang aufgrund der lokalen Klimatologie oder eines potenziellen Stadteffekts kann auf Basis dieser Auswertung nicht ermittelt werden.

Zusätzlich sind die TOP 10 der durch pluviale Hochwasser nach KAISER et al. (2021) betroffenen Städte markiert. Ihr Katalog der pluvialen Hochwasserereignisse umfasst alle erfassten Ereignisse bis zum Jahr 2017, wobei aufgrund der Datenverfügbarkeit der Großteil der enthaltenen Ereignisse ab dem Jahr 2000 stattfand. Die Daten sind also nicht direkt vergleichbar und können aufgrund der enthaltenen historischen Ereignisse durchaus differieren. Nichtsdestotrotz gibt der Vergleich einen Hinweis darauf, dass die entwickelten meteorologischen Ereigniskataloge extreme Ereignisse, die zu pluvialen Hochwassern führen, gut abbilden. So finden sich 7 der TOP 10 auch unter den ersten 11 Plätzen in KlamEx (bei Sortierung nach Ereignismaxima in W3_Eta). Die am stärksten von pluvialen Hochwassern betroffenen Städte – Berlin, München und Hamburg – nehmen auch im Ereigniskatalog nach W3_Eta die ersten 3 Plätze ein. Beim Katalog T5_Eta liegt München aufgrund der höheren statistischen Niederschläge nur auf Rang 6, was die Auswahl des Katalogs W3_Eta als Hauptkatalog im Rahmen von KlamEx unterstützt.

5.2. Statistische Analysen

Die statistischen Analysen umfassen räumliche und zeitliche Statistiken. Die räumlichen Statistiken sind Auszählungen der Ereignisanzahlen – hierbei zählt die charakteristische Ereignisfläche – pro RADKLIM-Raster von einem Quadratkilometer Fläche in der originären polarstereografischen Projektion, wobei der Zeitraum oder die Dauerstufenbereiche variieren. Die zeitlichen Statistiken sind Summationen der Ereignisse pro definierter Zeiteinheit über den ganzen Radarerfassungsbereich. Dabei werden alle Ereignisse des Katalogs ohne räumliche Einschränkungen berücksichtigt.

5.2.1. Räumliche Statistik

Auswertungen zur räumlichen Statistik wurden für verschiedene Zeitscheiben durchgeführt. Dabei besteht die Möglichkeit, Ereignisse nach der Vielzahl von Attributen zu selektieren, sodass an dieser Stelle nur ausgewählte Ergebnisse gezeigt werden können.

Abbildung 13 zeigt die Anzahl der Ereignisse aller Dauerstufen zwischen einer und 72 Stunden für alle Einzeljahre des Datensatzes von 2001 bis 2019. Man erkennt deutlich die starken Schwankungen von Jahr zu Jahr. Verbreitet liegt die Anzahl der Extremereignisse pro Jahr bei 0 bis 2, lokal in einzelnen Jahren auch höher. In den meisten Jahren ist eine Häufung der Ereignisanzahl im Alpenraum und teilweise auch in den Mittelgebirgen zu erkennen. Deutlich sichtbar sind die extremen Niederschlagsereignisse im Jahr 2002 im Norden im Zusammenhang mit dem Tief Cathleen (Rang 3 der Dauerregenereignisse in Kapitel 5.1) sowie das extremste Ereignis des Katalogs im Osten, das zum Elbehochwasser führte (vgl. Kapitel 5.1). Im Jahr 2010 ist das lange Niederschlagsband über dem Münsterland und Osnabrück deutlich erkennbar, das verbreitet zu Schäden durch Überflutungen führte. Dieses Ereignis wird im Rahmen der Fallstudien in Abschnitt 7.3.5. näher beleuchtet, da Einsatzdaten der Feuerwehr Nordwalde bereitgestellt werden konnten.

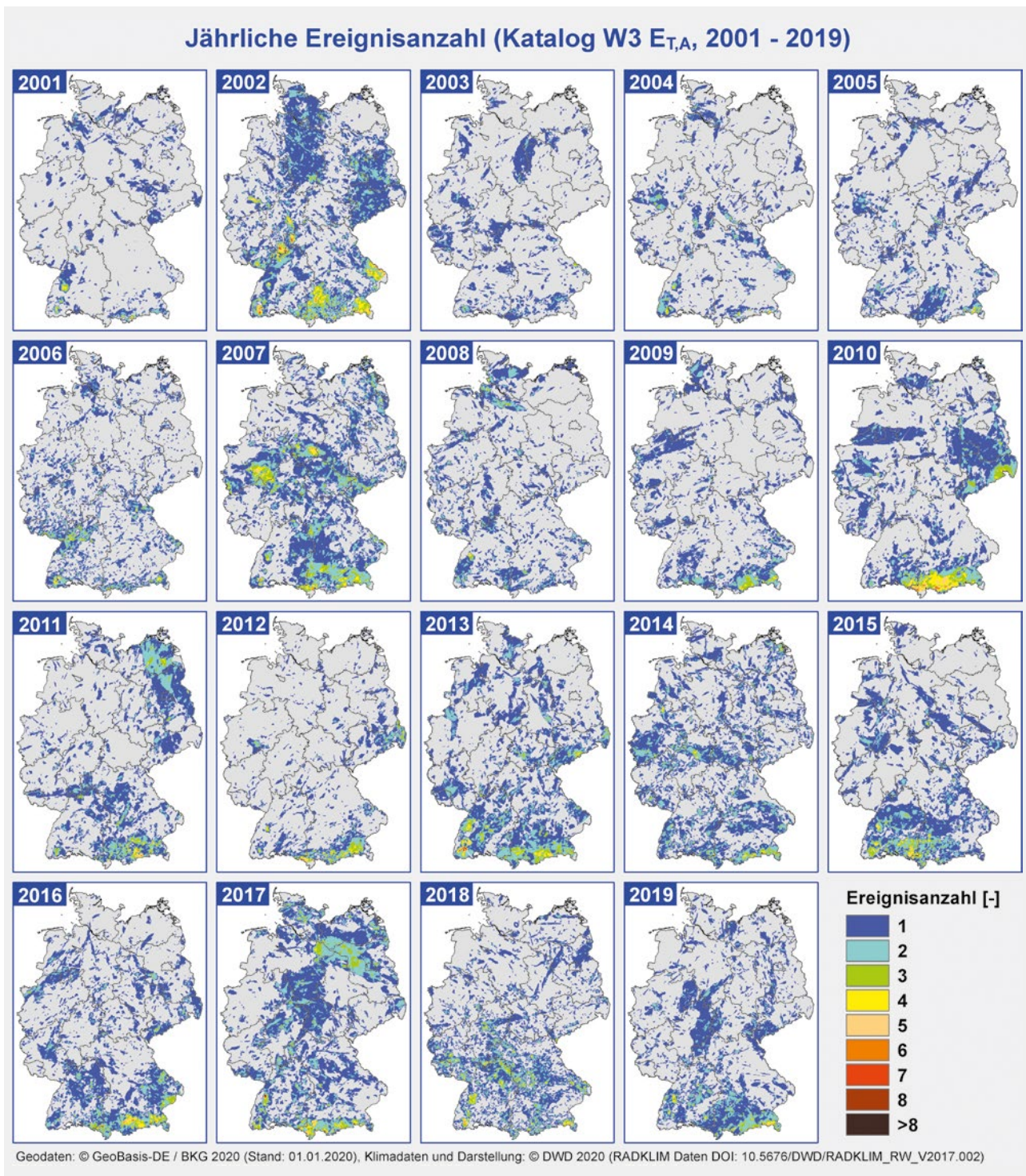


Abb. 13: Jährliche Ereignisanzahl pro Pixel für die Jahre 2001 bis 2019; Katalog nach Warnstufe 3 und Extremität.

Abbildung 14 zeigt die Anzahl der Extremereignisse über alle Jahre von 2001 bis 2019 für die 12 Kalendermonate. Es zeigt sich deutlich, dass die meisten Extremereignisse in den Monaten Mai bis August/September auftreten. Neben einem deutlich ausgeprägten Schwerpunkt im

Alpenraum sowie einigen großräumigen Ereignissen treten in diesen Monaten über ganz Deutschland verteilt viele kleinräumige Ereignisse auf, denen kein räumlicher Schwerpunkt zugeordnet werden kann. Dieses Ergebnis bestätigt erste Auswertungen im Rahmen des Radarklimaprojekts

(WINTERRATH et al. 2017). Diese deutschlandweite Verteilung kleinräumiger Ereignisse kurzer Dauerstufen wird in Abbildung 15 noch einmal verdeutlicht, welche die räumliche Verteilung in Abhängigkeit dreier Dauerstufenklassen bis 4, 9 und 72 Stunden zeigt. Während die Ereignisse langer

Dauerstufen eine klare geografische Struktur aufweisen, sind die Ereignisse kurzer Dauerstufe relativ gleich über Deutschland verteilt, mit einer leichten Zunahme Richtung Süden, insbesondere dem Alpenraum.

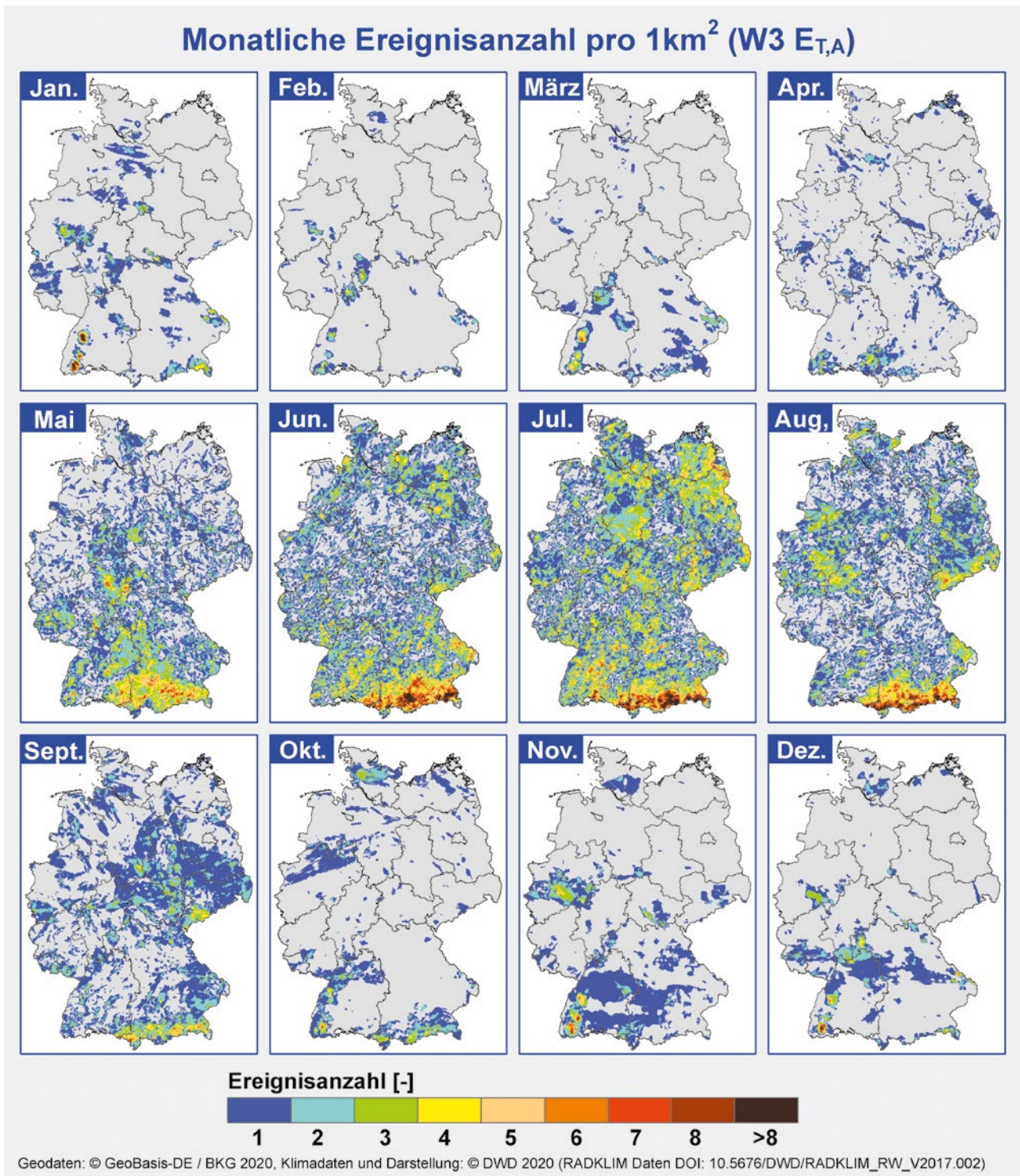


Abb. 14: Monatliche Ereignisanzahl pro Pixel für die Jahre 2001 bis 2019 (Summe).

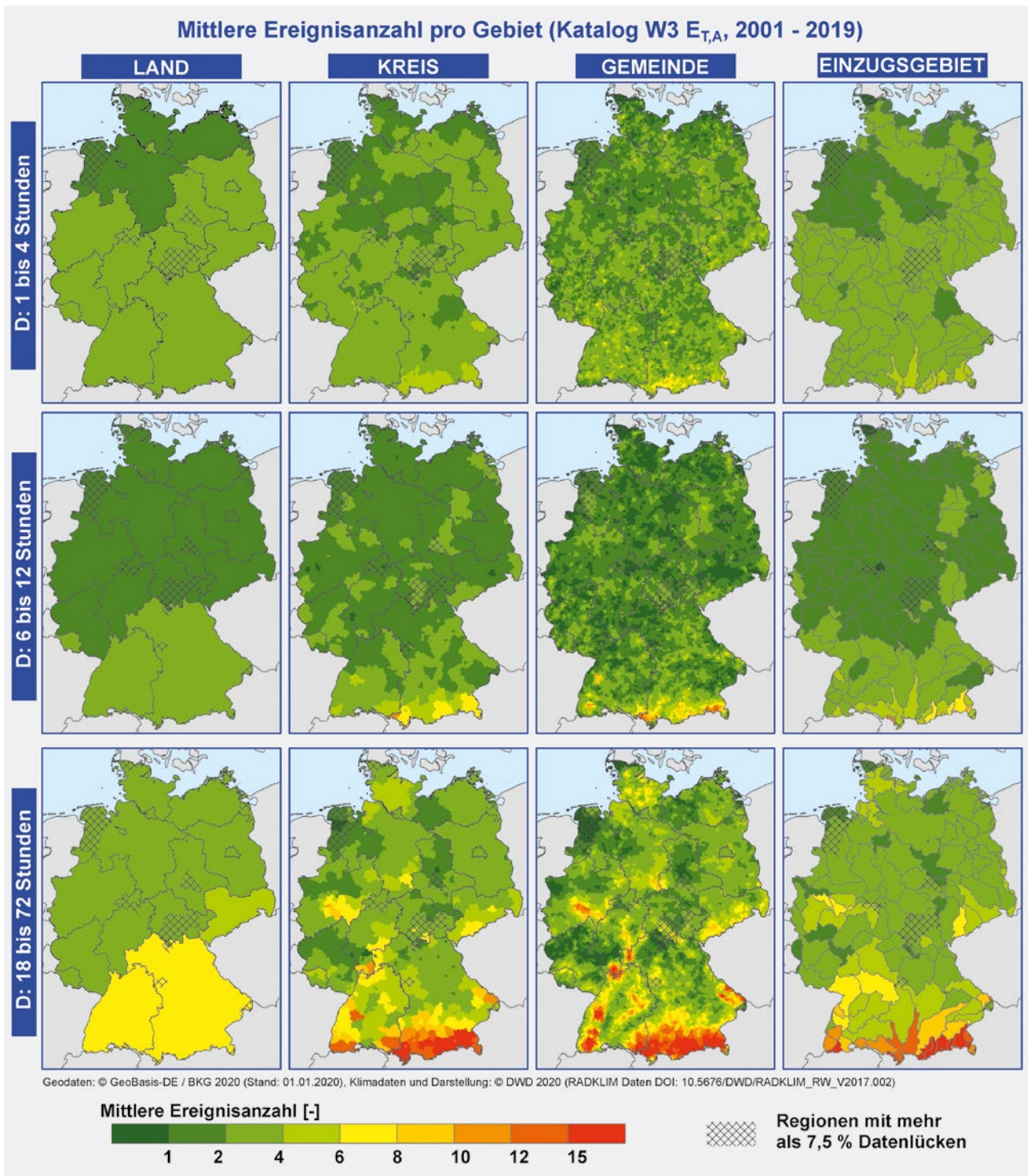


Abb. 15: Mittlere Ereignisanzahl pro Land, Kreis, Gemeinde und Flusseinzugsgebiet (von links nach rechts) für Ereignisse kurzer (oben), mittlerer (Mitte) und langer (unten) Dauerstufen. Mit Zunahme der charakteristischen Dauerstufe steigt die Korrelation der räumlichen Verteilung mit der Topografie.

5.2.2. Zeitliche Statistik

Im Rahmen einer zeitlichen Analyse wurden die jährlichen Ereignisanzahlen, aufgeteilt in die 11 untersuchten Dauerstufen, untersucht. Abbildung 6 zeigt die Ereignisanzahlen für die Jahre 2001 bis 2019 als Histogramm. Die blauen Farben stehen für kurze Andauern, die violetten Farben im oberen Teil der Balken für lange Dauerstufen, also Dauerregenereignisse. Hierbei fällt auf, dass das Jahr 2018, das eher durch die Dürre im Sommer in Erinnerung geblieben ist, die meisten Ereignisse aufweist. Auffallend ist dabei die Anzahl der Ereignisse kurzer Dauerstufen. Auch die Jahre 2002, 2006 und 2014 zeichnen sich durch hohe Ereigniszahlen aus. Aufgrund der objektorientierten Herangehensweise ermöglicht der Datensatz das Monitoring verschiedener Ereignisparameter über die Zeit. So zeigt Abbildung 8 die zeitliche Entwicklung der

akkumulierten Ereignisfläche, wiederum aufgeteilt nach Dauerstufen und entsprechend farblich markiert. Wie erwartet wird die durch die Extremereignisse betroffene Fläche maßgeblich durch Ereignisse langer Dauerstufe bestimmt. So sind 2002 – mit den Rängen 1 und 3 der extremsten Dauerregenereignisse (vgl. Kapitel 5.1) – und 2007 die Jahre mit den höchsten Werten der akkumulierten Ereignisfläche.

Abbildung 16 zeigt die jährliche Entwicklung der Ereignisfläche unterteilt nach dem mittleren SRI über die jeweilige Ereignisfläche. Es ist zu erkennen, dass die größten Flächenanteile Ereignissen mit einem mittleren SRI bis zu 4 zuzuordnen sind. Extreme mittlere SRI-Werte haben einen deutlich geringeren Anteil. Eine Ausnahme stellt wiederum das Jahr 2002 dar, in dem extreme Flächenniederschläge auftraten.

Jährliche Ereignisfläche in Abhängigkeit des Starkregenindex (SRI_{mean}, 2001-2019, D: 1-72 St.)

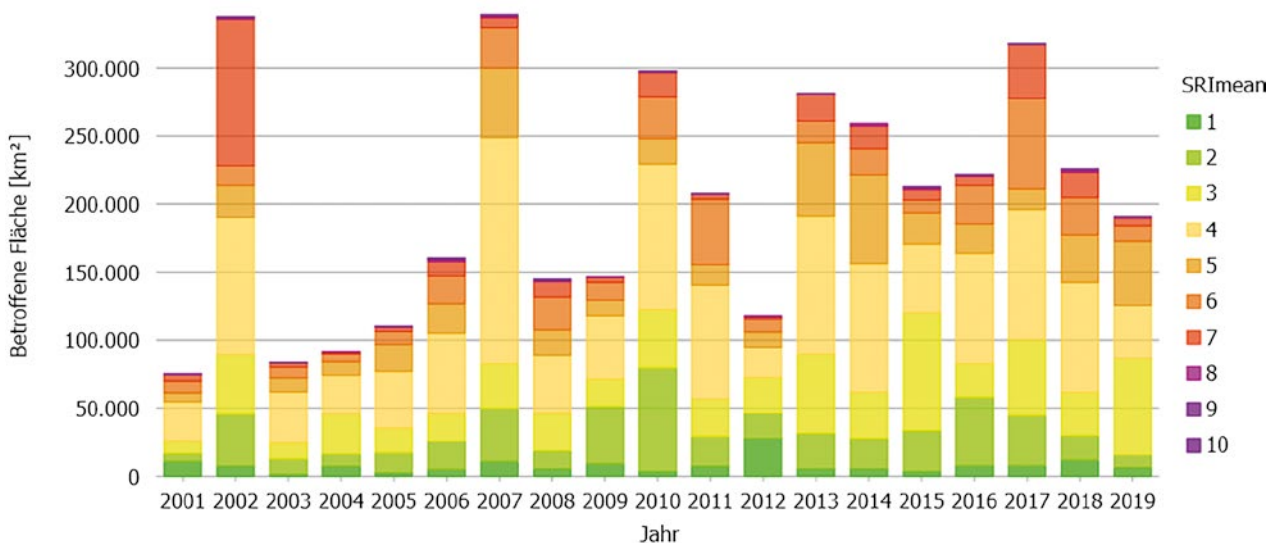


Abb. 16: Jährliche Gesamtfläche extremer Niederschlagsereignisse in Deutschland zwischen 2001 und 2019. Die unterschiedlichen Farben markieren den mittleren Starkregenindex der Ereignisse. Ereignisse mit einem SRI bis 4 machen in jedem Jahr mehr als die Hälfte der Ereignisfläche aus.

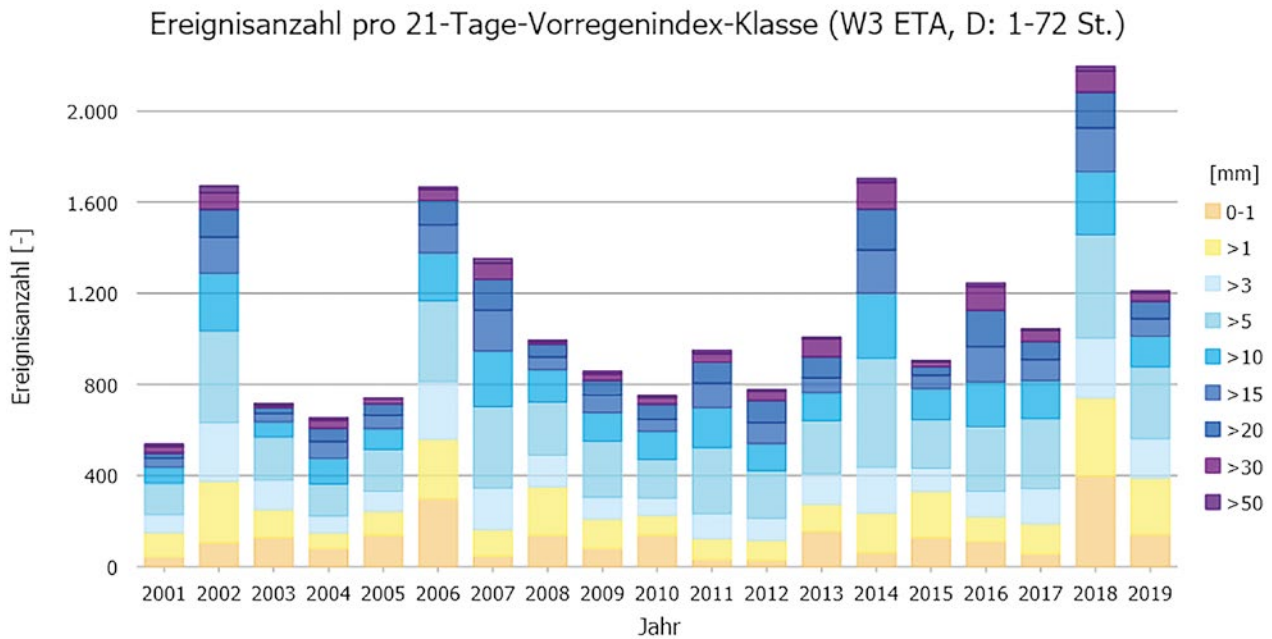


Abb. 17: Jährliche Anzahl extremer Niederschlagsereignisse in Deutschland zwischen 2001 und 2019. Die unterschiedlichen Farben markieren den Wert des Vorregenindexes.

Um bereits zum jetzigen Zeitpunkt Aussagen über den Einfluss des Klimawandels treffen zu können, folgen im Abschnitt 5.3.1.1 Ergebnisse der Zusammenhangsanalysen im Hinblick auf eine potenzielle Clausius-Clapeyron-Skalierung.

Der Vorregenindex basiert auf den im Vorfeld eines Extremereignisses gefallenen Niederschlägen und stellt ein Maß für die Sättigung des Bodens und damit einen erhöhten potenziellen

Impakt dar. Abbildung 17 zeigt den jährlichen Verlauf der Ereignisanzahlen für verschiedene Werte des Vorregenindexes. Die insgesamt recht niederschlagsarmen Jahre 2018 und 2019 weisen vergleichsweise eine hohe Anzahl an Extremereignissen mit sehr geringem Vorregenindex auf. Der relative Anteil der Ereignisanzahlen in definierten Vorregenindexklassen zeigt über die Jahre keine systematischen Änderungen.

Monatliche Anzahl der Extremregenereignisse (D: 1-72 h, W3_ETA)

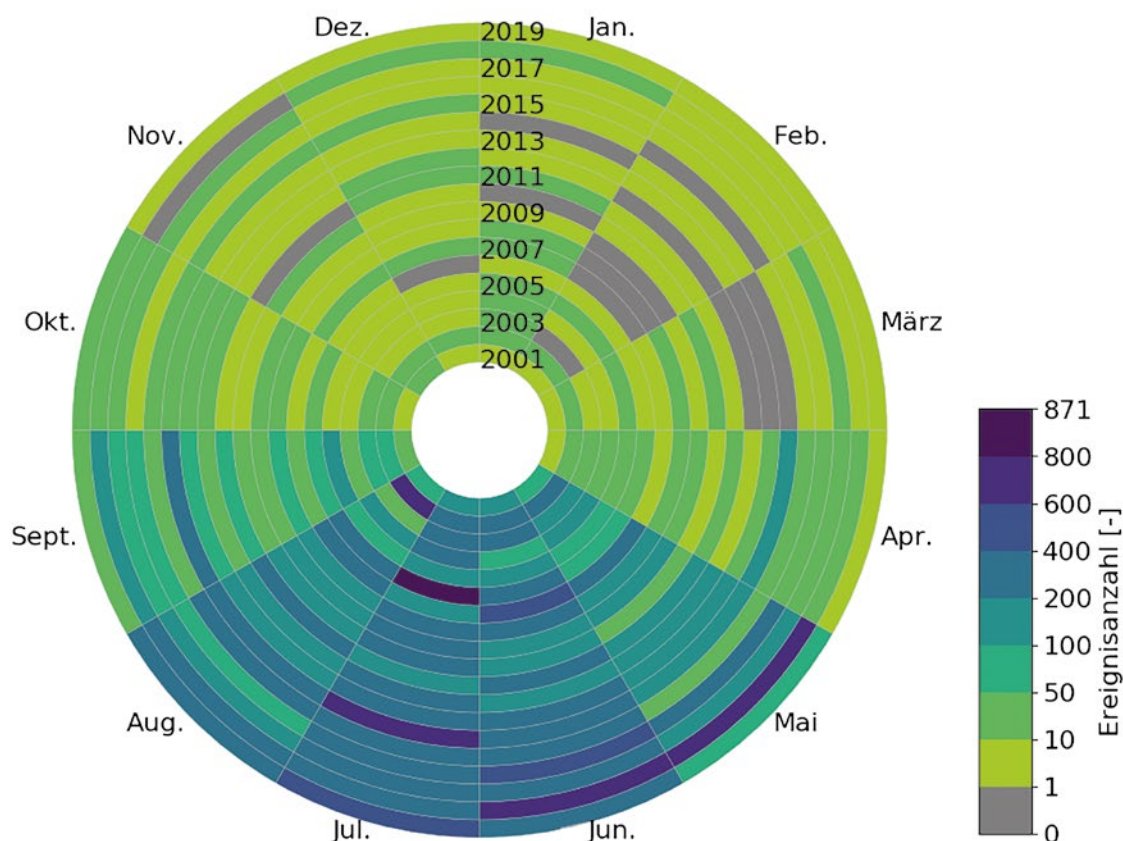


Abb. 18: Monatliche Anzahl der Ereignisse von 2001 bis 2019, summiert über alle Pixel des räumlichen Abdeckungsgebiets. Die Ringe zeigen die Jahre von 2001 (innen) bis 2019 (außen) und die Kalendermonate im Uhrzeigersinn. Die Farben stehen für die Ereignisanzahlen. Man erkennt deutlich die Häufung der Ereignisse im Sommerhalbjahr.

Betrachtet man den zeitlichen Verlauf der Ereignisanzahlen und -flächen über die bislang vorliegenden 19 Jahre, stellt man fest, dass ein geringer Anstieg zu erkennen ist, der insbesondere durch die sehr geringen Zahlen in den Jahren 2001 und 2003 bis 2005 gestützt wird. Eine Änderung der Niederschlagsintensität, ausgedrückt durch den mittleren SRI, ist nicht zu erkennen – lediglich der Anteil der Ereignisse mit einem mittleren SRI von 4 ist in den letzten Jahren leicht erhöht. Aufgrund der kurzen Zeitreihe lassen sich zu diesem Zeitpunkt jedoch noch keine statistisch signifikanten Rückschlüsse auf eine potenzielle

Zunahme der Anzahl oder Fläche der Extremereignisse im Zusammenhang mit dem Klimawandel ziehen. Das Verfahren erlaubt aber zum ersten Mal das objektive datenbasierte Monitoring von Extremereignissen und liefert damit eine Grundlage, um zukünftig Fragen zur potenziellen Änderung extremer Niederschlagsereignisse im Klimawandel beantworten zu können.

Eine Möglichkeit der hochauflösten Visualisierung des zeitlichen Auftretens von Extremereignissen bieten die sogenannten Ereignisuhren in den Abbildungen 18 bis 20. Sie zeigen die

Ereignisanzahl bzw. -fläche für die einzelnen Tage oder Monate des vorliegenden Datensatzes. Dabei ist jedes Jahr durch einen Ring dargestellt: Der innere Ring steht für das Jahr 2001, der äußere für 2019. Die Tage bzw. Monate sind im Uhrzeiger-

sinn beginnend bei „0 Uhr“ aufgetragen. Die Farbcodierung gibt die Anzahl bzw. akkumulierte Fläche an. Die entsprechende Darstellung für die Kalenderwochen befindet sich im Anhang.

Tägliche Anzahl der Extremregenereignisse (D: 1-72 h, W3_ETA)

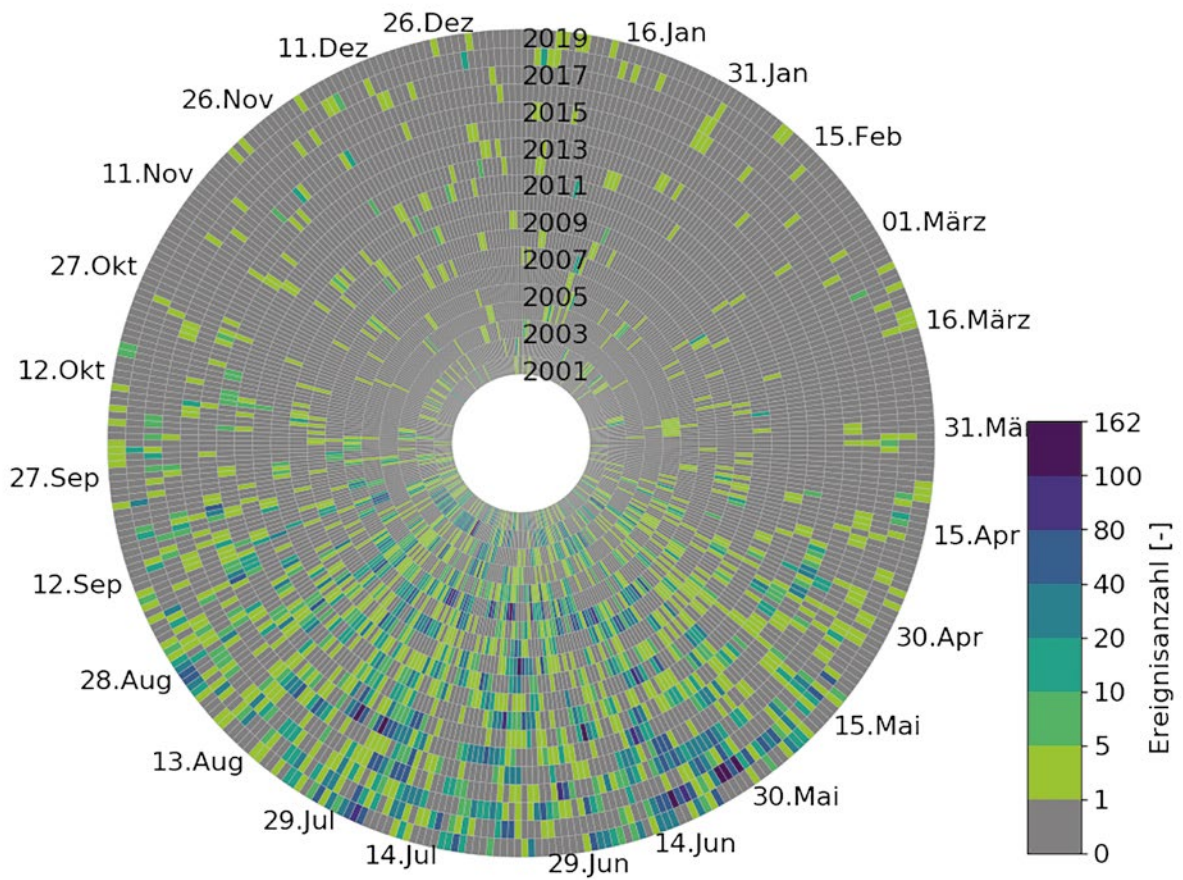


Abb. 19: Tägliche Anzahl der Ereignisse von 2001 bis 2019, summiert über alle Pixel des räumlichen Abdeckungsgebiets. Die Ringe zeigen die Jahre von 2001 (innen) bis 2019 (außen) und die Tage des Jahres im Uhrzeigersinn. Die Farben stehen für die Ereignisanzahlen.

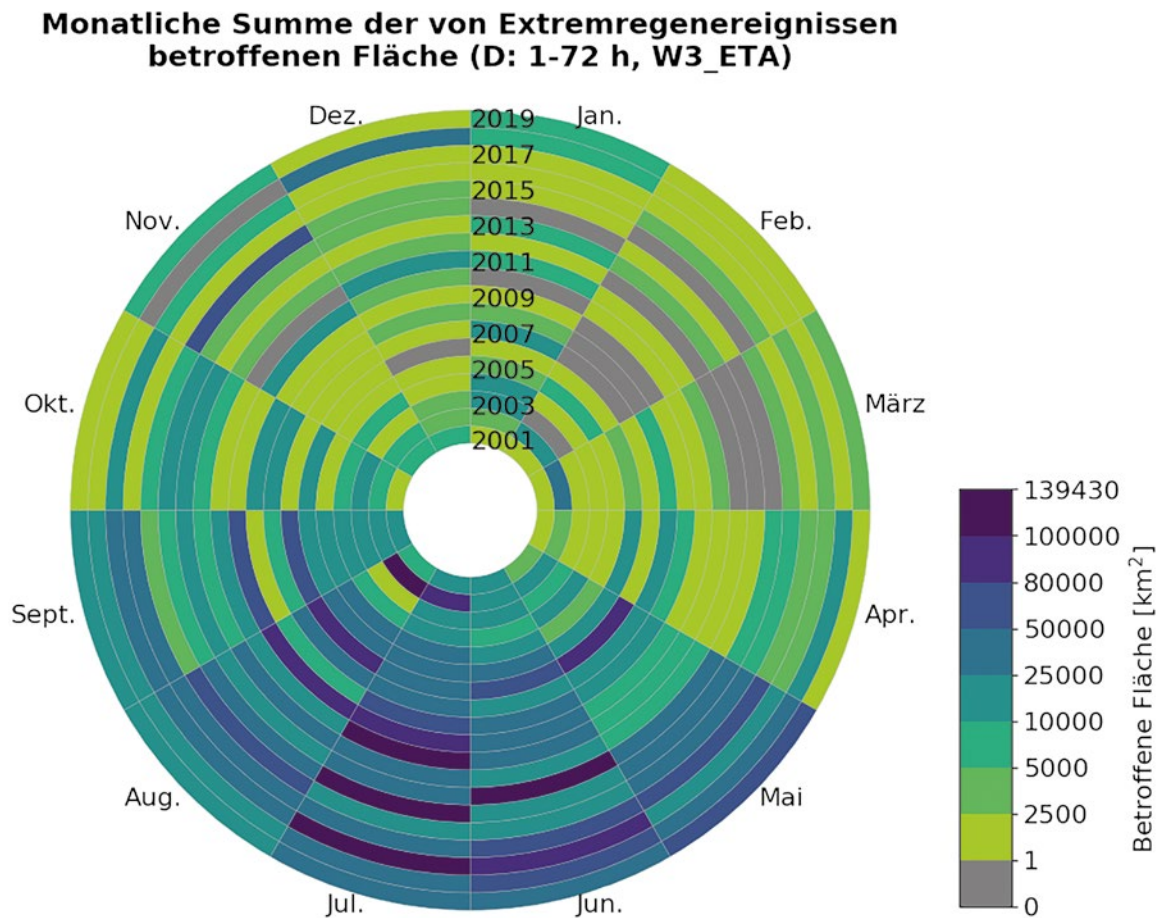


Abb. 20: Monatliche Summen der Ereignisflächen von 2001 bis 2019, summiert über alle Pixel des räumlichen Abdeckungsgebiets. Die Ringe zeigen die Jahre von 2001 (innen) bis 2019 (außen) und die Kalendermonate im Uhrzeigersinn. Die Farben stehen für die Ereignisanzahlen. Man erkennt deutlich die Häufung der Ereignisse im Sommerhalbjahr.

Man erkennt deutlich, dass die meisten Starkniederschlagsereignisse im Sommerhalbjahr auftreten. Die meisten Ereignisse (871) traten im Juli 2006 auf. Auffallend ist die hohe Anzahl an Ereignissen Ende Mai/Anfang Juni 2018, erkennbar an der dunkelblauen Färbung. Zoomt man noch etwas genauer herein, erkennt man einzelne aufeinanderfolgende Tage mit hohen Ereigniszahlen. Diese Periode mit deutschlandweit verbreiteten Starkregenereignissen hat unter anderem in Rheinland-Pfalz zu Überschwemmungen geführt (NIKOGOSIAN et al. 2020). Dass das Jahr 2018 in der Jahresbetrachtung extrem erscheint, ist also insbesondere auf diese beiden Wochen zurückzuführen. Längere Phasen mit Extremereignissen treten in mehreren Jahren auf, dabei aber ausschließlich in der konvektiven Saison.

Blickt man auf die Verteilung der Ereignisfläche (Abbildung 20), sieht man auch hierbei eine

deutliche Konzentration in den Monaten Mai bis September, wobei aber auch in den angrenzenden Monaten und bis ins Spätjahr deutliche Signale zu erkennen sind. Der Grund dafür liegt in der Tatsache begründet, dass stratiforme Niederschlagsgebiete große Ereignisflächen zur Gesamtstatistik beitragen. Der am wenigsten durch extreme Niederschlagsereignisse betroffenen Monat ist der Februar.

Neben dem zeitlichen Verlauf wurde untersucht, inwieweit sich Muster in der Auftrittswahrscheinlichkeit der Extremereignisse zeigen. Abbildungen 21 und 22 zeigen die Ereignisanzahl pro Wochentag und Uhrzeit bezogen auf die Startzeit der Ereignisse (die Abbildungen unter Verwendung der Endzeit zeigen kaum Unterschiede) für alle Dauerstufen sowie Dauerstufen bis 6 Stunden. Die Ähnlichkeit der Abbildungen zeigt, dass das Gesamtbild stark von

den konvektiven Ereignissen geprägt ist. Sie zeigen das erwartete Bild mit einer Häufung der Ereignisse am Nachmittag und Abend, wenn typischerweise sommerliche Konvektion auftritt. Interessant ist das Minimum zu Wochenbeginn begleitet von einem verspäteten Beginn der Konvektion an Montagen. Ob es sich hierbei um einen zufälligen Befund handelt oder – vergleichbar zur Ozonbelastung – ein Einfluss durch den Wochengang des Verkehrsaufkommens besteht, kann im Rahmen dieses Projekts nicht näher beleuchtet werden.

Abbildung 23 zeigt den Jahresgang der Extremereignisse für jeden Kalendertag (bezogen auf die Startzeit des Ereignisses). Hierbei ist wiederum deutlich zu erkennen, dass die meisten Extremereignisse in den Monaten Mai bis August/September auftreten. Häufungen sind Anfang Juni und Ende Juli zu erkennen, wobei keine Aussage darüber getroffen werden kann, ob es sich hierbei um zufällige Verteilungen in den 19 Jahren oder um potenzielle Muster in den Auftrittswahrscheinlichkeiten handelt.

2001-2019 Ereignisanzahl (alle Dauerstufen) abhängig von der Startzeit (UTC)

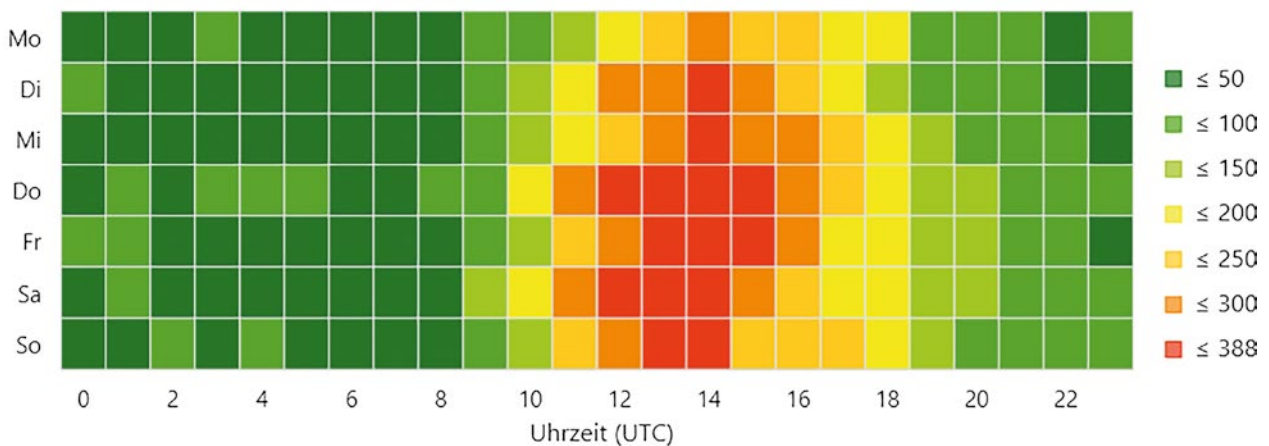


Abb. 21: Ereignisanzahl (Farbcodierung) nach Wochentag (Zeilen) und Uhrzeit (Spalten) des Ereignisstarts für alle Ereignisse zwischen 2001 und 2019 für alle Dauerstufen. Aufgrund der Dominanz kürzerer Dauerstufen ist der typische Tagesgang für konvektive Ereignisse widerspiegelt. Der Montag ist der Tag mit den wenigsten Ereignissen.

2001-2019 Ereignisanzahl (Dauerstufen ≤ 6 Stunden) abhängig von der Startzeit (UTC)

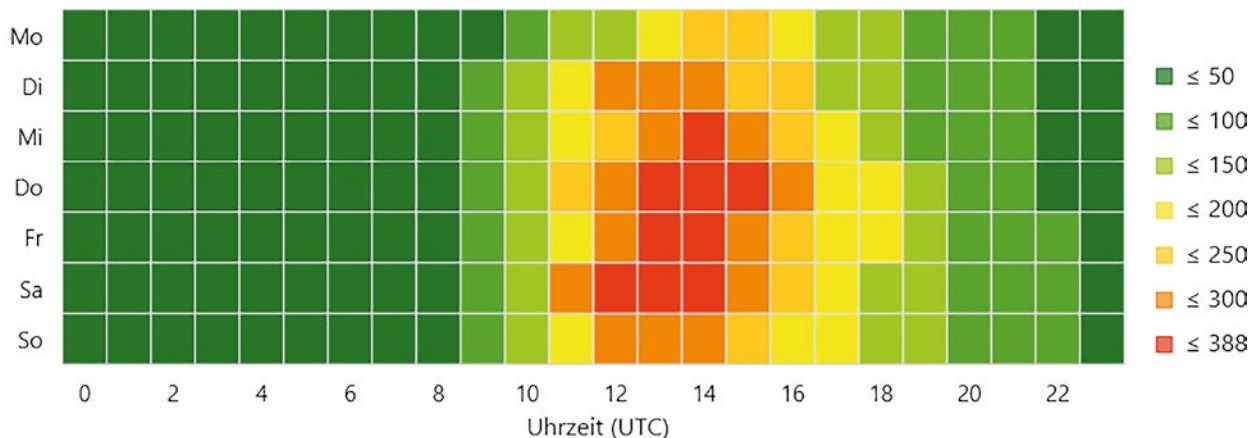


Abb. 22: Ereignisanzahl (Farbcodierung) nach Wochentag (Zeilen) und Uhrzeit (Spalten) des Ereignisstarts für alle Ereignisse zwischen 2001 und 2019 mit einer charakteristischen Dauerstufe von bis zu 6 Stunden. Der typische Tagesgang für konvektive Ereignisse wird widerspiegelt. Der Montag ist der Tag mit den wenigsten Ereignissen und weist ein späteres Tagesmaximum auf.

2001-2019 Ereignisanzahl in Deutschland (Alle Dauerstufen)

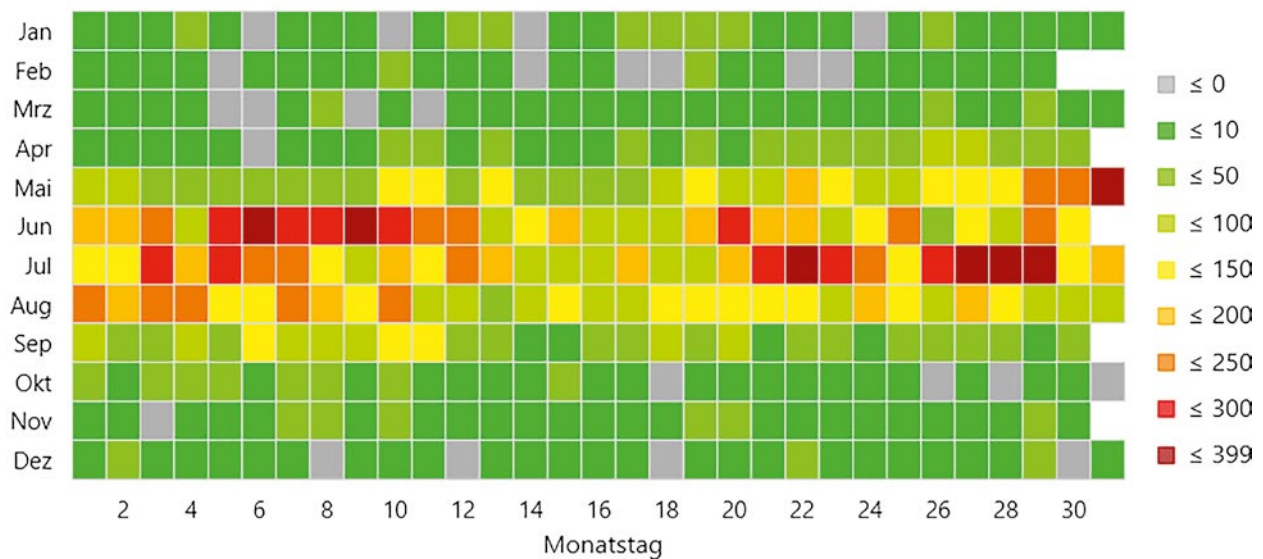


Abb. 23: Ereignisanzahl (Farbcodierung) nach Kalendermonat (Zeilen) und Monatstag (Spalten) des Ereignisstarts für alle Ereignisse zwischen 2001 und 2019 für alle Dauerstufen. Hohe Ereignisanzahlen sind in den Jahren in der ersten Junidekade und der letzten Julidekade aufgetreten.

5.3. Zusammenhangsanalysen

Um das räumliche und zeitliche Auftreten extremer Niederschlagsereignisse detaillierter zu untersuchen, wurden verschiedene Zusammenhangsanalysen durchgeführt. Ziel war es, potenzielle Zusammenhänge der Ereigniseigenschaften mit meteorologischen und geografischen Parametern, die als Attribute im Ereigniskatalog enthalten sind, zu untersuchen und somit Rückschlüsse auf etwaige räumliche Verstärkungsfaktoren sowie klimatologische Trends zu ziehen.

5.3.1. Meteorologische Attribute

Als meteorologische Attribute mit einem potenziellen Einfluss auf die Bildung und Charakteristik von Extremereignissen werden die Temperatur und die Wetterlagen der objektiven Wetterlagenklassifikation untersucht. Eine potenzielle Abhängigkeit der Extremereignisse von der Temperatur ermöglicht zudem eine Aussage zu einer zukünftigen Entwicklung von Extremereignissen auf der Basis von Klimaprojektionen, die positive Temperaturtrends mit sehr hoher Übereinstimmung projizieren.

5.3.1.1. Temperatur – Der Clausius-Clapeyron-Effekt

Die Clausius-Clapeyron-Gleichung beschreibt die Zunahme der Aufnahmekapazität einer Luftmasse für Wasserdampf in Abhängigkeit von der Temperatur. Das Ziel der vorliegenden statistischen Untersuchung ist es, einen potenziellen Zusammenhang zwischen Attributen des Ereigniskatalogs und der Temperatur aufzuzeigen. Die Temperaturdaten in 2 Metern Höhe werden dem TRJ-Basisdatensatz entnommen, der die Temperatur bereits auf einem mit RADKLIM vergleichbaren Gitter anbietet und zudem eine Temperaturerhöhung durch den Stadtklimaeffekt beinhaltet. Der TRJ-Datensatz liegt leider aktuell nur bis zum Jahr 2012 vor, sodass die Auswertung nur für 12 Jahre erfolgen konnte. Eine Fortschreibung der Auswertung wird angestrebt.

Als Referenzpunkt der Temperatur in Raum und Zeit wurden der Ort des maximalen Niederschlags sowie der Zeitpunkt 2 Stunden vor dem Start des jeweiligen Ereignisses gewählt. Ein Einfluss des genauen Ortes ist aufgrund der geringen Gradienten in der Temperaturverteilung nicht zu erwarten, insbesondere nicht im Hinblick auf die besonders interessanten klein-

räumigen Starkregenereignisse kurzer Andauer. Die Verwendung der Temperatur 2 Stunden vor Ereignisbeginn liegt darin begründet, dass erwartet wird, dass diese Temperatur die für die Niederschlagsbildung entscheidende thermische Situation am besten widerspiegelt. Zu einem späteren Zeitpunkt ist die Temperatur gegebenenfalls bereits durch dynamische und thermodynamische Effekte des Niederschlagsgeschehens selbst oder durch das Wettergeschehen wie Frontendurchgänge beeinflusst. Dies zeigt sich auch in den Abbildungen 24 bis 26. Gezeigt sind die Ereignisanzahlen pro Temperaturklasse, farblich markiert entsprechend der Dauerstufe. Im zeitlichen Verlauf ändert sich die Ereignisverteilung deutlich von einer breiten Verteilung im Temperaturbereich zwischen knapp 20 °C bis knapp 30 °C zu einer schmaleren Verteilung mit einem Maximum unterhalb von 20 °C. Für kurzlebige Extremereignisse bis zu 2 Stunden Andauer verschiebt sich das Maximum von 24 bis 25 °C zu 20 °C. Eine Temperaturverschiebung aufgrund der Tageszeit ist eher unwahrscheinlich, da die maximale Konvektionstätigkeit nach Abbildung 25 eher mit dem typischen Temperaturverlauf eines nachmittäglichen Maximums einhergeht. Unter Verwendung der Temperatur vor dem Ereignis ist gewährleistet, dass auch im Bereich der höheren Temperaturen ausreichend viele Ereignisse vorhanden sind. Für die niedrigen Temperaturbereiche unterhalb von 15 °C ist die Anzahl hingegen sehr gering, was zu dem unsteten Kurvenverlauf in diesem Bereich beitragen könnte.

Der Effekt der Temperaturskalierung wurde für folgende Attribute durchgeführt:

- maximale Niederschlagsintensität (RRmax/Duration)
- mittlere Niederschlagsintensität (RRmean/Duration)
- Gesamtniederschlag (RRmean * Area)
- Extremität (Et,a)
- charakteristische Ereignisfläche (Area)
- charakteristische Dauerstufe (Duration)
- maximaler Starkregenindex (SRI_{max})
- mittlerer Starkregenindex (SRI_{mean})

Dabei gelten die Werte immer ereignisspezifisch, also für die charakteristische Dauerstufe, sowie bezogen auf alle Pixel der charakteristischen Ereignisfläche. Der Einfachheit halber wurde die Pixelfläche mit einem Quadratkilometer und demnach eine Niederschlagshöhe von einem Millimeter mit einer Menge von einem Liter pro Quadratkilometer gleichgesetzt. Die Analysen werden für die Ereignisse aller Dauerstufen gemeinsam, separat für die Dauerstufe 1 h, alle konvektiven Ereignisse mit einer charakteristischen Dauerstufe von 6 Stunden oder weniger sowie alle vorwiegend stratiformen Ereignisse mit Dauerstufen zwischen 9 und 72 h präsentiert. Sowohl die Extremität als auch die Starkregenindizes sind dabei unabhängig von der Dauerstufe und erlauben somit eine unabhängige Interpretation der Ergebnisse. Um den Einfluss des Zeitpunkts auf die Ergebnisse zu untersuchen, wurden die Auswertungen zusätzlich mit den Temperaturen zu Start- sowie Endzeitpunkt und der mittleren Temperatur über die charakteristische Andauer durchgeführt. Der Einfluss auf die ermittelten Verläufe wird beispielhaft für einstündige Ereignisse analysiert.

Abbildungen 27 bis 31 zeigen die Ergebnisse der Auswertungen für die Perzentile p50 (Median), p75 (gibt den Wert des 75-%-Perzentils an, über dem 25 % der Werte der Verteilung liegen), p90 und p99 sowie den Mittelwert. Die schwarzen Linien geben die Steigung entsprechend einer einfachen Clausius-Clapeyron-Skalierung (CC) um 7 % (gestrichelt) bzw. doppelten Clausius-Clapeyron-Skalierung (2CC) um 14 % (strichpunktirt) an. Der Achsenabschnitt wurde dabei aus Gründen der Sichtbarkeit so gewählt, dass die Funktionswerte in der Mitte der Temperaturachse dem Wert des 90-%-Perzentils entsprechen. Es ist zu beachten, dass es sich um Perzentile bezogen auf bereits vorselektierte Extremereignisse handelt und nicht um Niederschlagsperzentile.

Ereignisanzahl in Abhängigkeit der 2-m-Temperatur 2 Std. vor Ereignisbeginn (nach Dauerstufe sortiert)

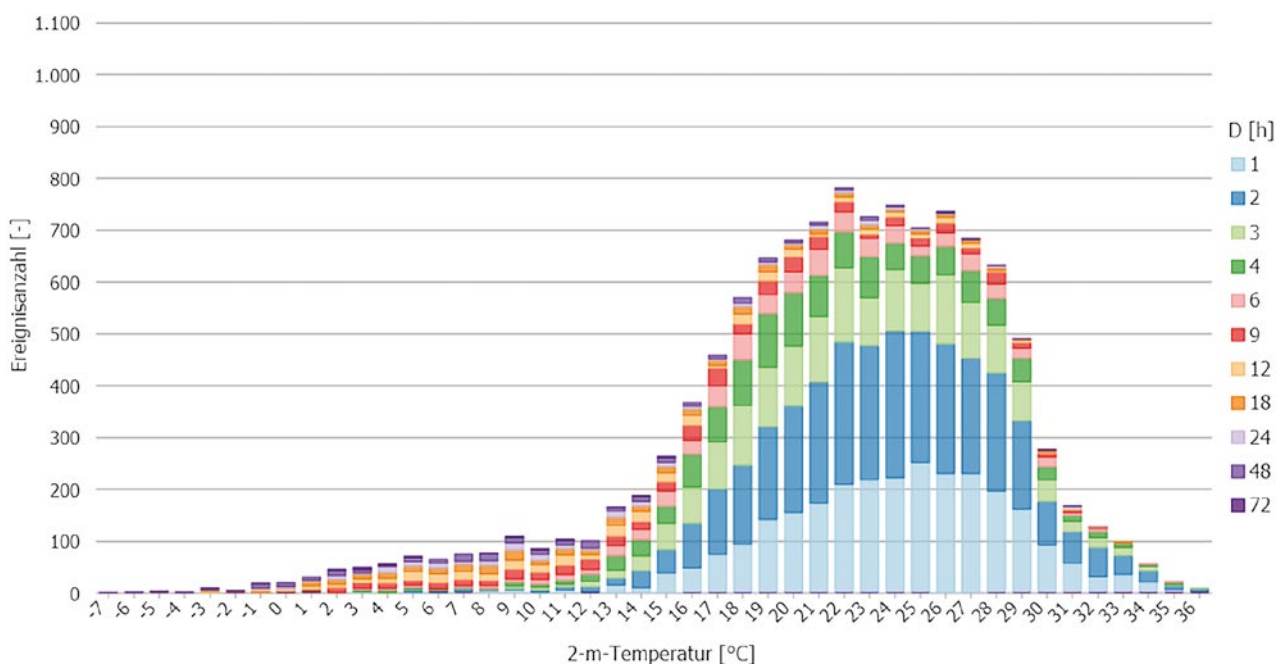


Abb. 24: Anzahl aller extremen Niederschlagsereignisse in den Jahren 2001 bis 2012 in Abhängigkeit der 2-m-Temperatur zum Zeitpunkt 2 Stunden vor dem Ereignisbeginn. Die Farbcodierung zeigt die charakteristischen Dauerstufen der Ereignisse an.

Ereignisanzahl in Abhängigkeit der 2-m-Temperatur am Ereignisbeginn (nach Dauerstufe sortiert)

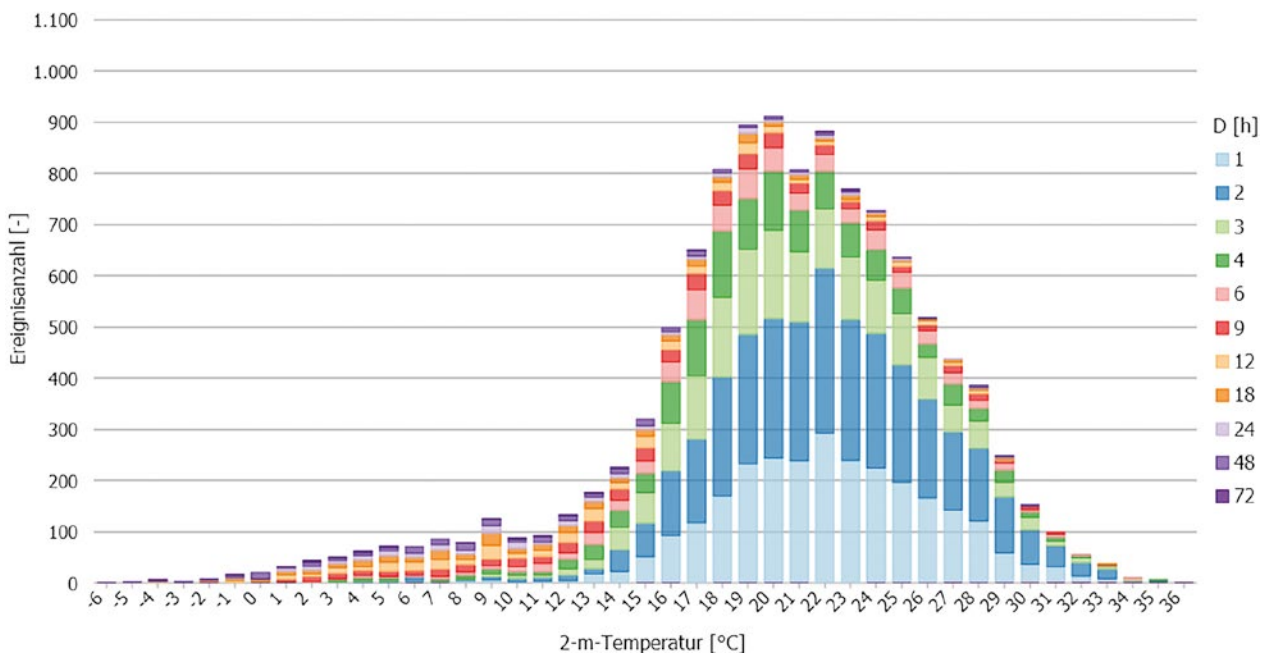


Abb. 25: Anzahl aller extremen Niederschlagsereignisse in den Jahren 2001 bis 2012 in Abhängigkeit der 2-m-Temperatur zum Zeitpunkt des Ereignisbeginns. Die Farbcodierung zeigt die charakteristischen Dauerstufen der Ereignisse an.

Ereignisanzahl in Abhängigkeit der mittleren 2-m-Temperatur über die Ereignisdauer (nach Dauerstufe sortiert)

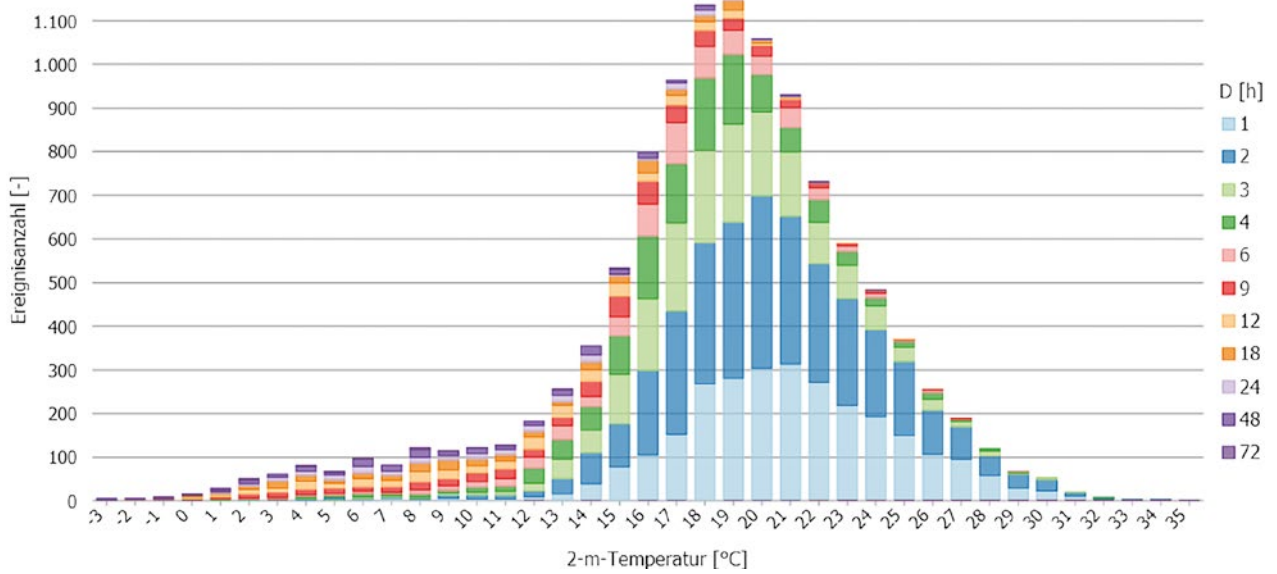


Abb. 26: Anzahl aller extremen Niederschlagsereignisse in den Jahren 2001 bis 2012 in Abhängigkeit der über die Ereignisdauer gemittelten 2-m-Temperatur. Die Farbcodierung zeigt die charakteristischen Dauerstufen der Ereignisse an.

Temperaturskalierung (2001-2012 TRJ-Basisdaten, 2-m-Temperatur - 2 Std. vor Ereignisbeginn)
 ausgewählter Charakteristiken extremer Niederschlagsereignisse.
 Katalog: WARNSTUFE3_Eta, v20200407, ohneMPP, Dauerstufen: bis 1 Std.

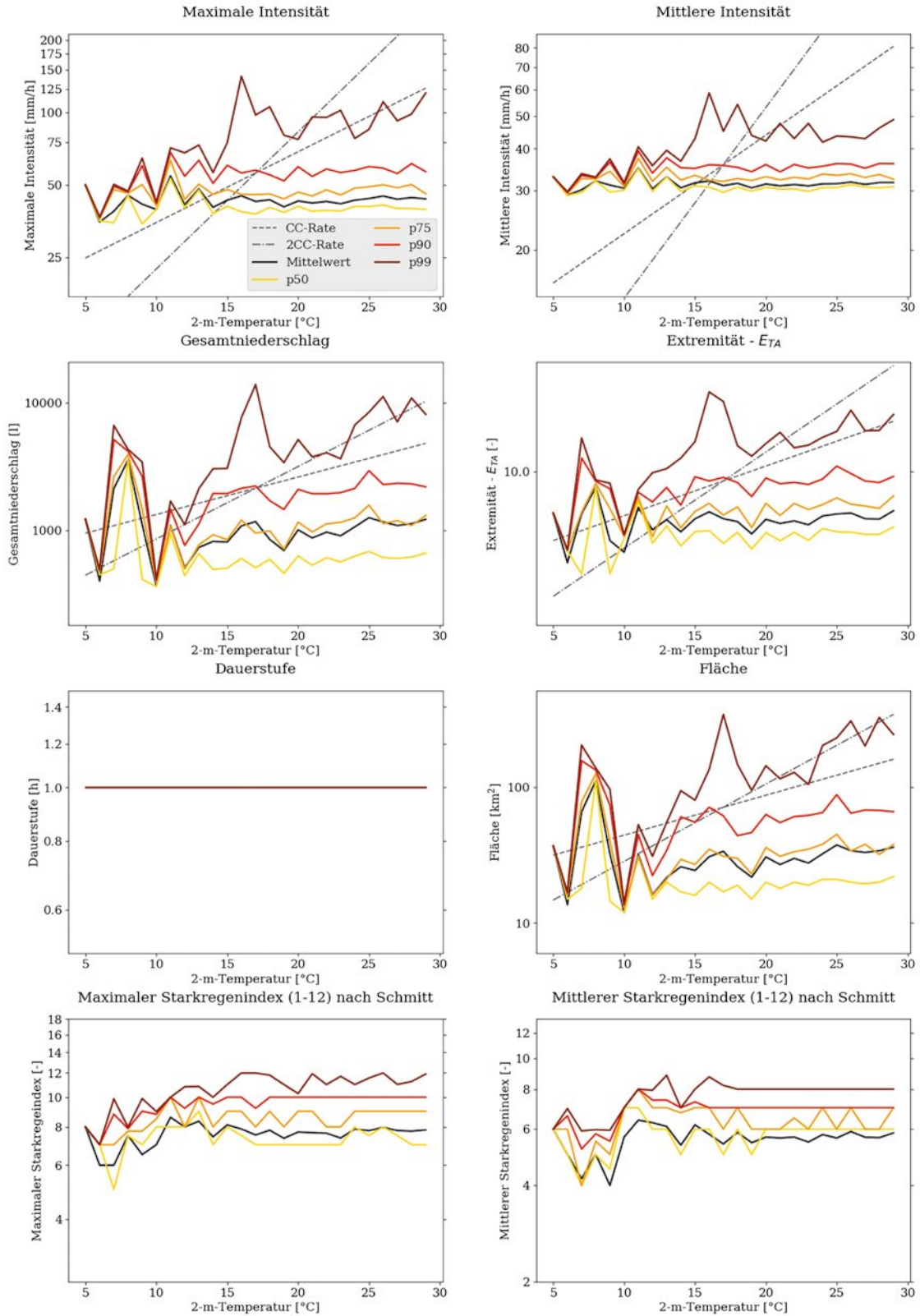


Abb. 27: Abhängigkeit verschiedener Ereignisattribute (s. Text) von der 2-m-Temperatur 2 Stunden vor dem Startzeitpunkt für alle einstündigen Ereignisse zwischen 2001 und 2012. Dargestellt sind jeweils die 50-, 75-, 90- und 99%-Perzentile sowie der Mittelwert. Die gestrichelte und die strichpunktlierten Linien symbolisieren die Anstiege entsprechend einer einfachen und doppelten Clausius-Clapeyron-Skalierung.

Temperaturskalierung (2001-2012 TRJ-Basisdaten, 2-m-Temperatur - Mittelwert über Ereignisdauer)
 ausgewählter Charakteristiken extremer Niederschlagsereignisse.
 Katalog: WARNSTUFE3_Eta, v20200407, ohneMPP, Dauerstufen: bis 1 Std.

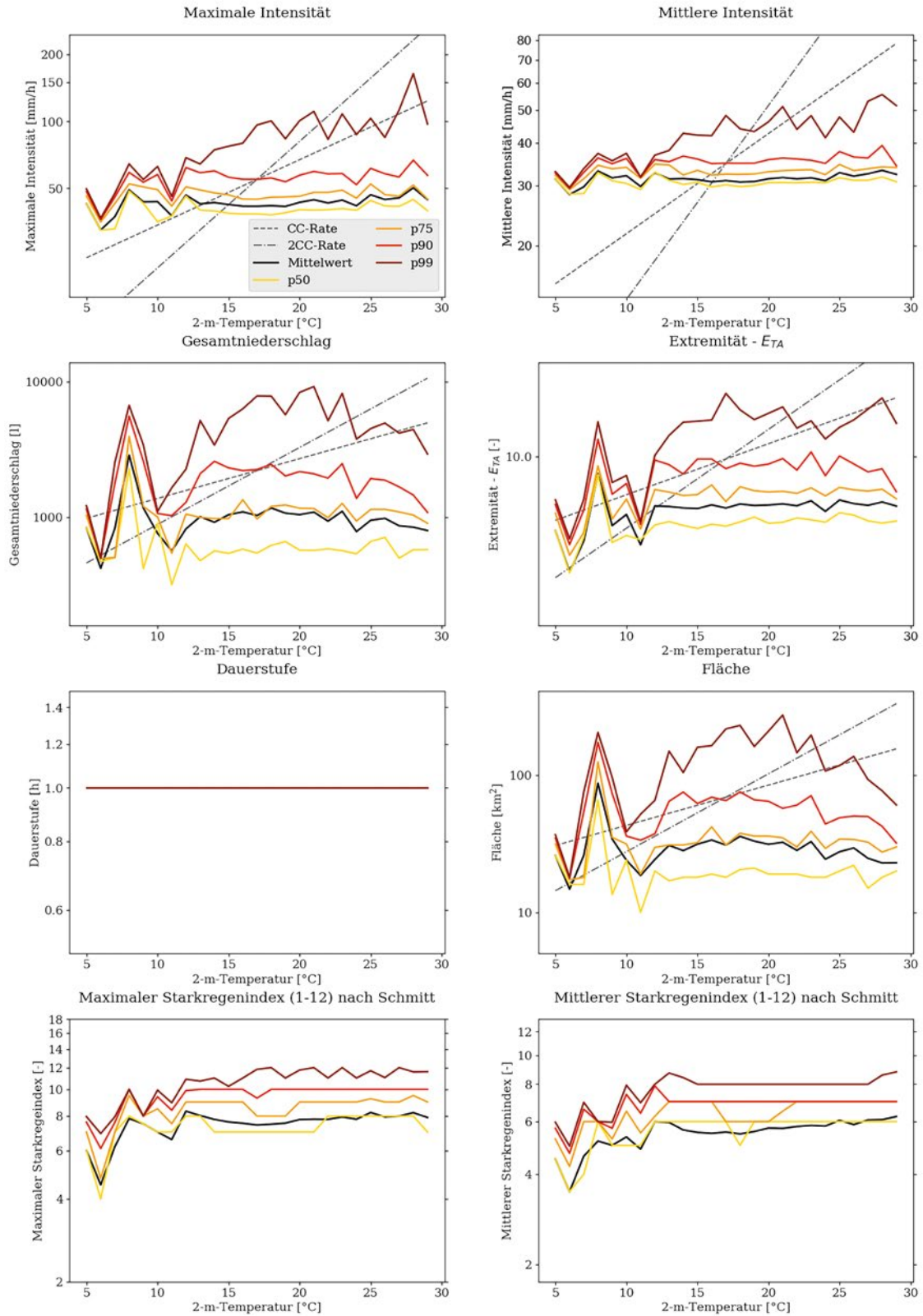


Abb. 28: wie Abbildung 27, aber für die mittlere Temperatur über die Ereignisdauer.

Temperaturskalierung (2001-2012 TRJ-Basisdaten, 2-m-Temperatur - 2 Std. vor Ereignisbeginn)
 ausgewählter Charakteristiken extremer Niederschlagsereignisse.
 Katalog: WARNSTUFE3_Eta, v20200407, ohneMPP, Dauerstufen: bis 72 Std.

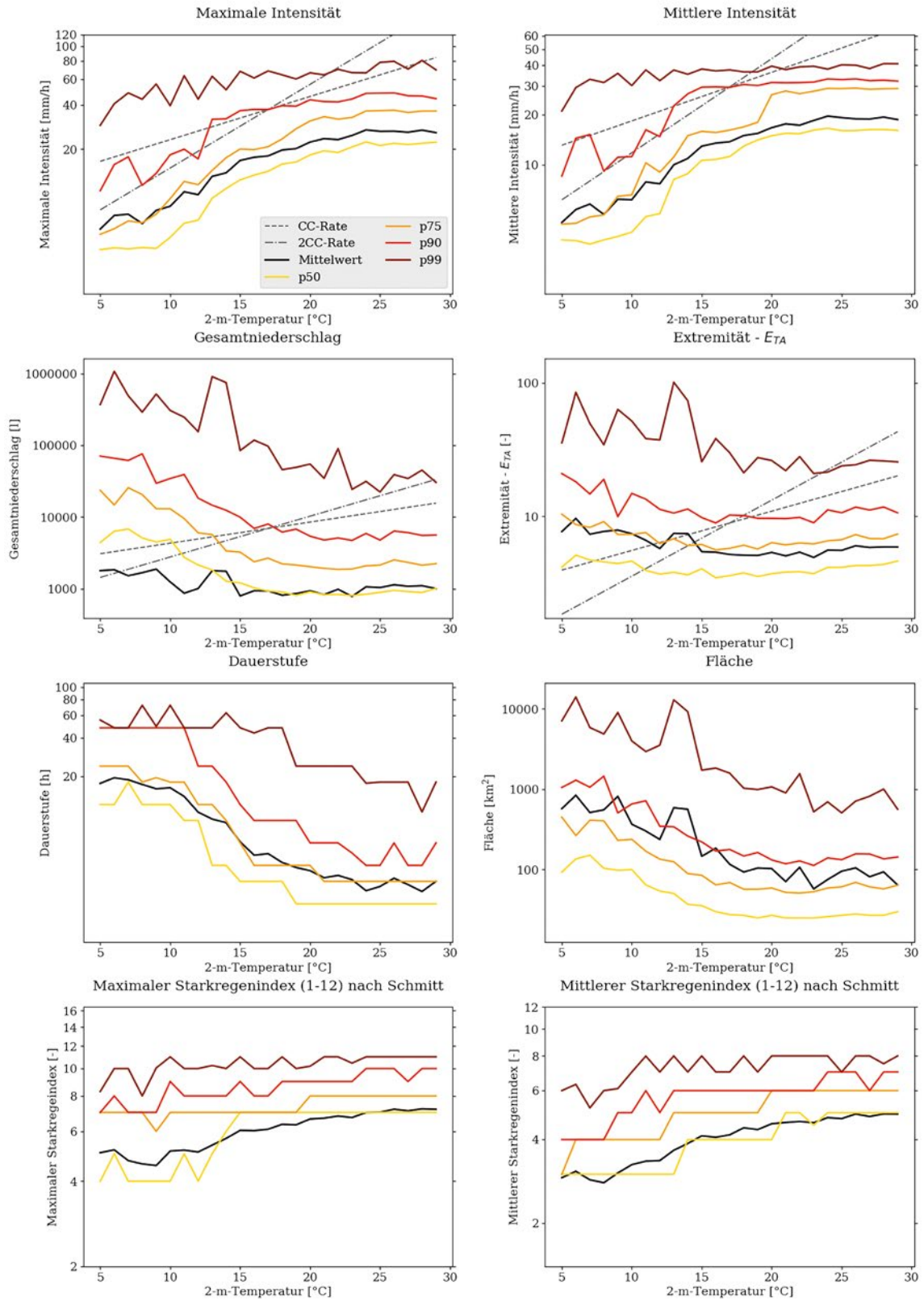


Abb. 29: wie Abbildung 27, aber für die Ereignisse aller Dauerstufen.

Temperaturskalierung (2001-2012 TRJ-Basisdaten, 2-m-Temperatur - 2 Std. vor Ereignisbeginn)
 ausgewählter Charakteristiken extremer Niederschlagsereignisse.
 Katalog: WARNSTUFE3_Eta, v20200407, ohneMPP, Dauerstufen: bis 6 Std.

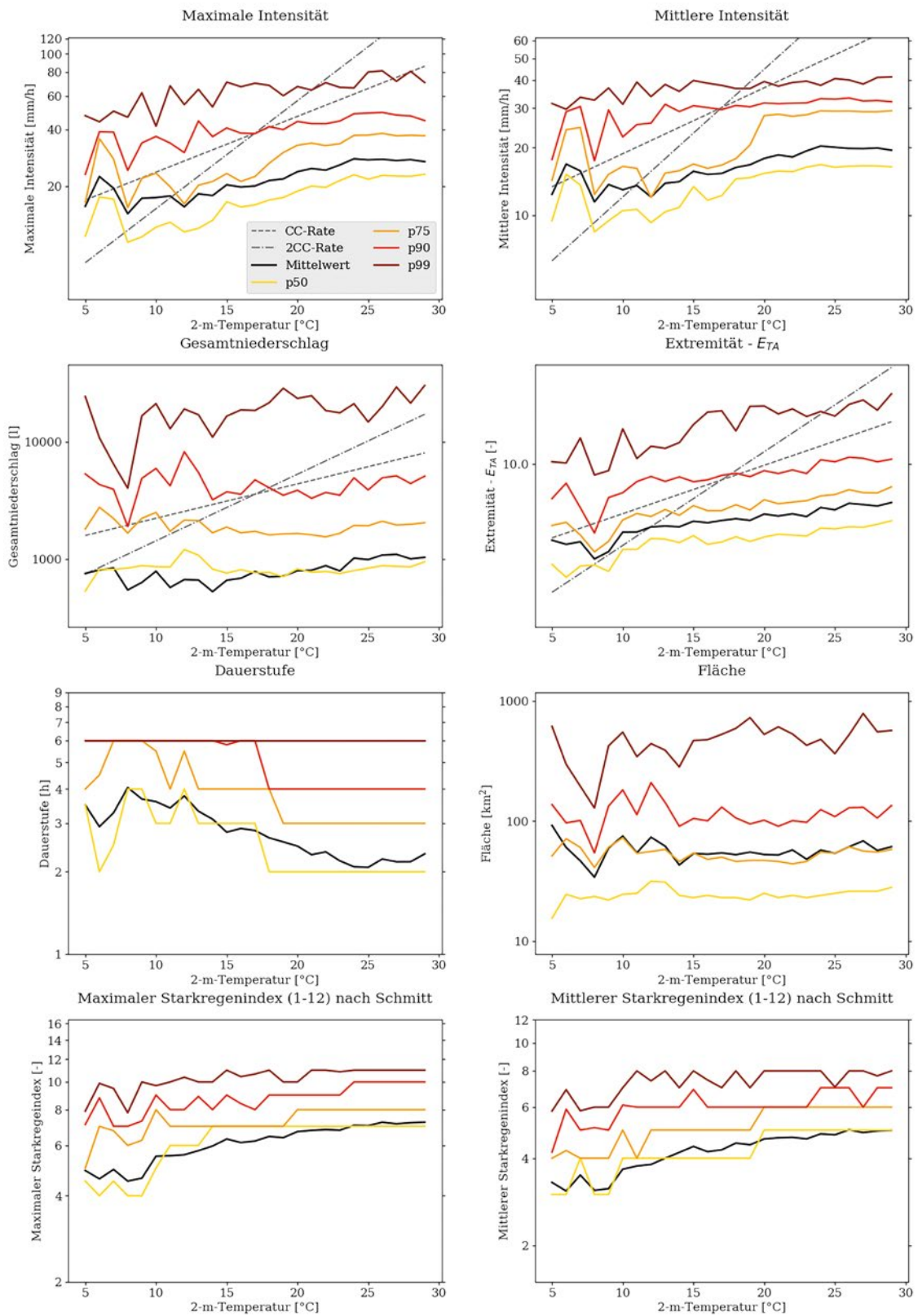


Abb. 30: wie Abbildung 27, aber für alle konvektiven Ereignisse mit charakteristischen Dauerstufen bis zu 6 Stunden.

Temperaturskalierung (2001-2012 TRJ-Basisdaten, 2-m-Temperatur - 2 Std. vor Ereignisbeginn)
 ausgewählter Charakteristiken extremer Niederschlagsereignisse.
 Katalog: WARNSTUFE3_Eta, v20200407, ohneMPP, Dauerstufen: 9 bis zum 72 Std.

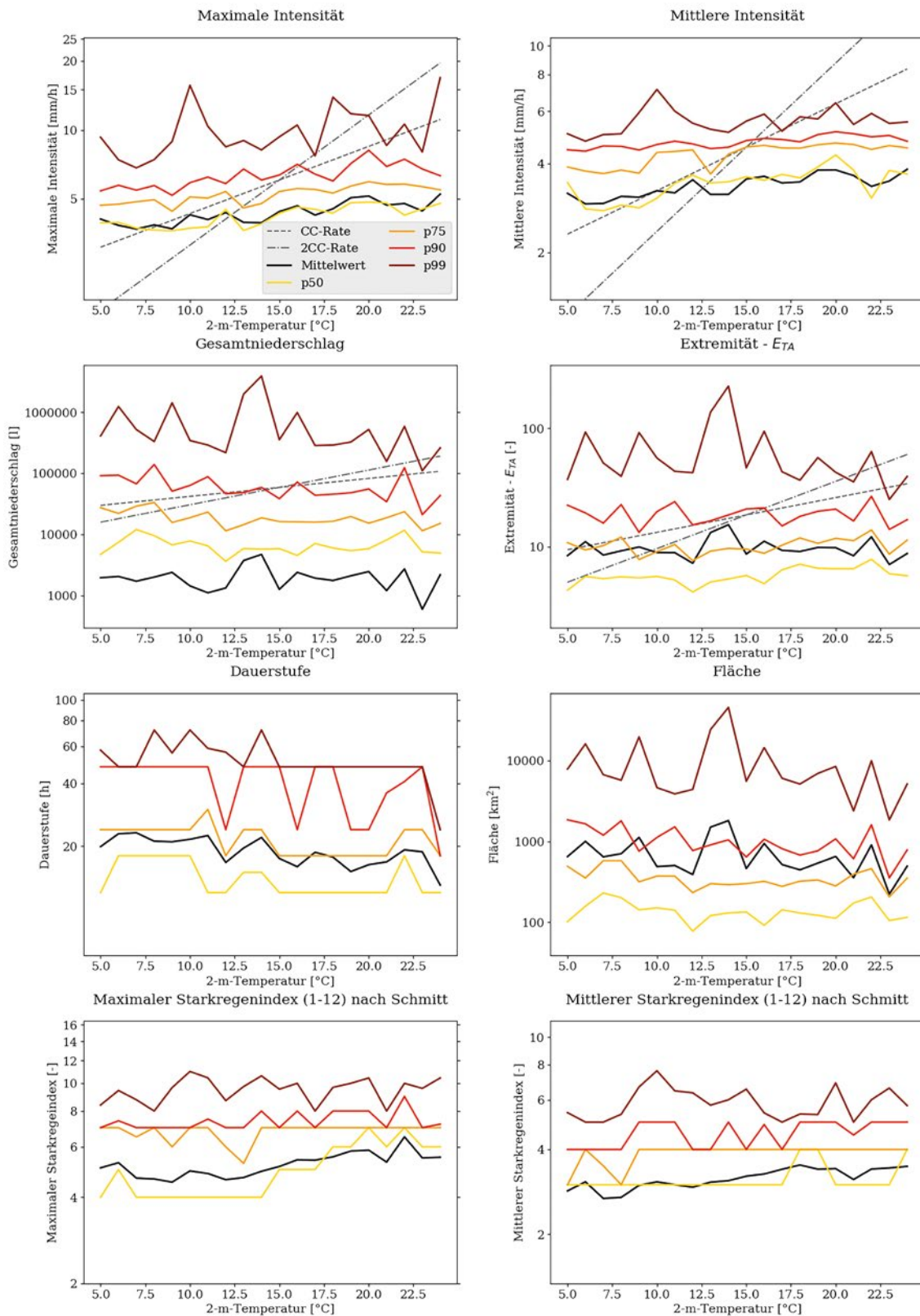


Abb. 31: wie Abbildung 27, aber für alle stratiformen Ereignisse mit charakteristischen Dauerstufen von 9 Stunden und länger.

Skalierung der einstündigen Ereignisse

Abbildung 27 zeigt die Ergebnisse der Analyse für alle extremen Niederschlagsereignisse mit einer charakteristischen Dauerstufe von einer Stunde. Als Temperatur wurde der Wert zum Zeitpunkt 2 Stunden vor dem Ereignisstart gewählt. Für das 99-%-Perzentil steigt die maximale Niederschlagsintensität (Pixel mit dem maximalen Niederschlagswert) mit der Temperatur mit einer Rate an, die unterhalb der CC-Rate liegt. Für die über die Ereignisfläche gemittelte Niederschlagsintensität ist der Anstieg noch etwas geringer. Für die geringeren Perzentile ist kein Anstieg sichtbar. Demgegenüber steigt die p99-Ereignisfläche stark mit einer Rate nahe der doppelten CC-Skalierung an. Ein starker Anstieg in der Fläche resultiert auch in einem höheren Gesamtniederschlag der Ereignisse über die jeweilige Ereignisfläche mit einer Super-CC-Skalierung. Die maximalen und mittleren Starkregenindizes steigen bis zu einer Temperatur von ca. 15 °C an und flachen dann ab, was u. a. mit dem möglichen Maximalwert des SRI von 12 zusammenhängt. Die Extremität steigt über die Temperatur an. Insbesondere das 99-%-Perzentil weist einen Anstieg von etwa der CC-Rate auf und ist stark durch die Fläche beeinflusst, die mit der Quadratwurzel in die Berechnung des $E_{t,a}$ eingeht.

Um die Rolle der Temperaturwahl auf die Verläufe zu demonstrieren, zeigt Abbildung 28 die entsprechenden Analysen in Abhängigkeit von der mittleren Temperatur über den Ereigniszeitraum. Im Gegensatz zur vorherigen Analyse steigen die Werte der charakteristischen Ereignisflächen nur über einen kurzen niedrigen Temperaturbereich an, flachen dann ab und sinken bei höheren Temperaturen wieder ab. Dieser Effekt zeigt sich ebenso im Gesamtniederschlag über die Ereignisfläche, der kein CC-Scaling mehr zeigt. Die Entwicklung der Intensitäten ist weniger beeinflusst und zeigt keine Abnahme im Bereich hoher Temperaturen. Wie bereits in den Niederschlagsverteilungen gesehen, kommt es zu einer Umordnung der extremsten Ereignisse, die nun einer geringeren Temperatur – mit einem Maximum bei ca. 20 °C – zugeordnet werden.

Mögliche Erklärungen könnten darin liegen, dass die größeren Ereignisse eher im Zusammenhang mit Luftmassenwechseln auftreten oder aber einen großräumigeren Einfluss auf die Temperaturen an ggf. entfernteren Stationen, die den interpolierten TRJ-Daten zugrunde liegen, besitzen. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass die geringeren Fallzahlen bei höheren Temperaturen im Fall der Verwendung der Temperatur während des Ereignisses statistisch bedingt eine (stärkere) Unterschätzung der hohen Perzentile zur Folge haben. Eine eindeutige Erklärung dieses Phänomens bedarf jedoch detaillierterer Studien, die den Rahmen des Projekts überschreiten, zu denen durch die Bereitstellung der Daten aber ausdrücklich ermutigt wird.

Skalierung der Ereignisse aller Dauerstufen

Abbildung 29 zeigt die Ergebnisse für alle im Rahmen des Projekts untersuchten Dauerstufen zwischen einer und 72 Stunden. Bei gemeinsamer Betrachtung aller Ereignisse steigen sowohl die maximale als auch die mittlere Ereignisintensität im Mittel sowie für alle gezeigten Perzentile außer p99, das einen geringeren Anstieg zeigt, bis zu einer Temperatur von ca. 13 °C mit einer doppelten CC-Rate an. Zu höheren Temperaturen werden die Kurven flacher und ebnen sich bei hohen Temperaturen ein. Dieses Verhalten geht mit einem entsprechend gegenläufigen Abfall der charakteristischen Dauerstufe sowie der Ereignisfläche einher, die einen Übergang von eher stratiformen zu konvektiven Ereignissen mit steigenden Temperaturen anzeigt. Die starke Abnahme der Ereignisfläche bedingt auch eine Abnahme der Ereignisextremität mit zunehmender Temperatur. Der Anstieg der Intensitäten gibt also nur eingeschränkt einen Hinweis auf eine Intensivierung der Niederschläge an sich. Einen Hinweis auf eine Intensivierung der Niederschläge gibt jedoch der Starkregenindex, der von der Dauerstufe unabhängig ist. Sowohl der mittlere als auch der maximale SRI nehmen zwischen etwa 10 °C und 25 °C um 2 Punkte zu.

Skalierung der konvektiven Ereignisse

Abbildung 30 zeigt die Ergebnisse für alle Ereignisse mit einer charakteristischen Dauerstufe zwischen einer und 6 Stunden, also Ereignisse

mit eher konvektivem Charakter. Die maximalen und mittleren Niederschlagsintensitäten nehmen mit einer Rate unterhalb der CC-Rate zu, wobei der Anstieg für geringere Perzentile etwas stärker ist als für die höheren. Die Zunahme der Intensitäten geht mit einer Abnahme der charakteristischen Dauerstufe einher, im Mittel von etwa 3 bis 4 Stunden auf einen Wert knapp über 2 Stunden. Mit steigender Temperatur erhöht sich demnach der Anteil kürzerer, intensiverer Extremereignisse. Eine Intensivierung der Ereignisse zeigt sich ebenso in den Zunahmen der Starkregenindizes. Die Gesamtniederschlagsmenge nimmt ebenfalls mit der Temperatur zu, wobei die Zunahme für das 99-%-Perzentil am größten ist. Die Extremität nimmt über alle Perzentile zu und erreicht für das 99-%-Perzentil fast die CC-Rate.

Skalierung der stratiformen Ereignisse

Abbildung 31 zeigt die Ergebnisse für Dauerstufen zwischen 9 und 72 Stunden – Ereignisse mit einem eher stratiformen Charakter. Der Temperaturbereich ist für diese Ereignisklasse eingeschränkt, da bei höheren Temperaturen zu wenige Ereignisse detektiert wurden. Die Änderungsraten mit der Temperatur sind in diesem Fall deutlich geringer als im Fall der konvektiven Zellen. Während die pixelbasierten Intensitäten leicht zunehmen, sinken die Kurven für die Gesamtniederschlagsmenge etwas ab, was auf die Abnahme der charakteristischen Ereignisfläche zurückzuführen ist. Die Extremität bleibt relativ konstant; die geringe Abnahme des 99-%-Perzentils ist auf den Einfluss der Ereignisfläche zurückzuführen. Der geringe Anstieg der Starkregenindizes – der Mittelwert steigt über den Temperaturbereich um ca. einen Punkt – deutet auf eine Zunahme der Ereignisintensität mit der Temperatur hin.

Da Klimamodelle mit sehr hoher Übereinstimmung eine Zunahme der mittleren und extremen Temperaturen projizieren, geben die Ergebnisse Hinweise darauf, dass die Extremität konvektiver Niederschlagsereignisse in Zukunft zunehmen könnte. Über alle Dauerstufen betrachtet führt die Abnahme der Größe der charakteristischen Ereignisfläche zu einer Reduktion der Ereignisextremität, während die Intensität zunimmt. Wie bereits in Kapitel 2.3 ausgeführt, spielen aber auch

dynamische Prozesse eine Rolle, die dem reinen Temperatureffekt überlagert sind.

5.3.1.2. Wetterlagen

Die Wetterlagen der objektiven Wetterlagenklassifikation bilden die großräumigen Strömungs- und thermodynamischen meteorologischen Gegebenheiten ab. Die Wetterlagen können dazu in verschiedene Cluster unterteilt werden. Abbildungen 32 und 33 zeigen die deutschlandweite Anzahl der Extremereignisse für trockene bzw. feuchte Wetterlagen unterteilt in die vorherrschende Anströmrichtung sowie die Zyklonalität der Wetterlage. Dabei sei darauf hingewiesen, dass die großräumige Wetterlage im Einzelfall nicht notwendigerweise die lokalen Strömungsverhältnisse am Ort des Ereignisses widerspiegeln muss.

Die Ergebnisse zeigen nur ein vereinzelt Auftreten extremer Ereignisse bei trockenen Wetterlagen. Insbesondere bei SO-Anströmung sowie bei der Kombination aus Bodentief und Höhenhoch sind in den betrachteten 19 Jahren nahezu keine Extremereignisse aufgetreten. Auffällig ist die Konzentration extremer Ereignisse im Berchtesgadener Land bei der Wetterlage NOAZT. Unter feuchten Luftmassenbedingungen treten insbesondere die SW-Anströmungen hervor, die verbreitet mit Extremereignissen einhergingen, wobei der Alpenraum bei SWZAF und SWAAF besonders betroffen war. Hervorzuheben ist darüber hinaus die Wetterlage XXZZF, die großflächig Extremereignisse hervorgebracht hat.

Betrachtet man die Ereigniseigenschaften (Abbildungen 34 und 35), stellt man fest, dass bei der Wetterlage SWZAF sowohl die größte Anzahl Extremereignisse aufgetreten ist als auch die größte Fläche betroffen war. Dabei dominieren bei der Ereignisanzahl die kurzen Dauerstufen, während bei der Fläche keine bevorzugte Dauerstufe der Ereignisse festgestellt werden kann. Die Wetterlage XXZZF zeichnet sich durch die größte von Extremereignissen betroffene Fläche aus, die insbesondere auf länger andauernde Ereignisse zurückzuführen ist. Die jährliche Ereignisfläche pro Anströmrichtung (Abbildung 36) zeigt keine offensichtlichen Änderungen in den Beiträgen bestimmter Wetterlagen an der betroffenen Gesamtfläche. Die Aufteilung in Abhängigkeit der Dauerstufen (Abbildungen 37

und 38) zeigt, dass Starkregenereignisse insbesondere bei SW-Lagen sowie bei advektionsarmen Wetterlagen auftreten, wobei bei Dauerregenereignissen der Anteil der XX-Lagen über die Zeit etwas ansteigt.

Außergewöhnlich ist der hohe Flächenanteil durch SO-Lagen im Jahr 2007 für Dauerstufen ab 12 Stunden. Zusammengefasst sind die Ergebnisse der Tabelle 5 zu entnehmen.

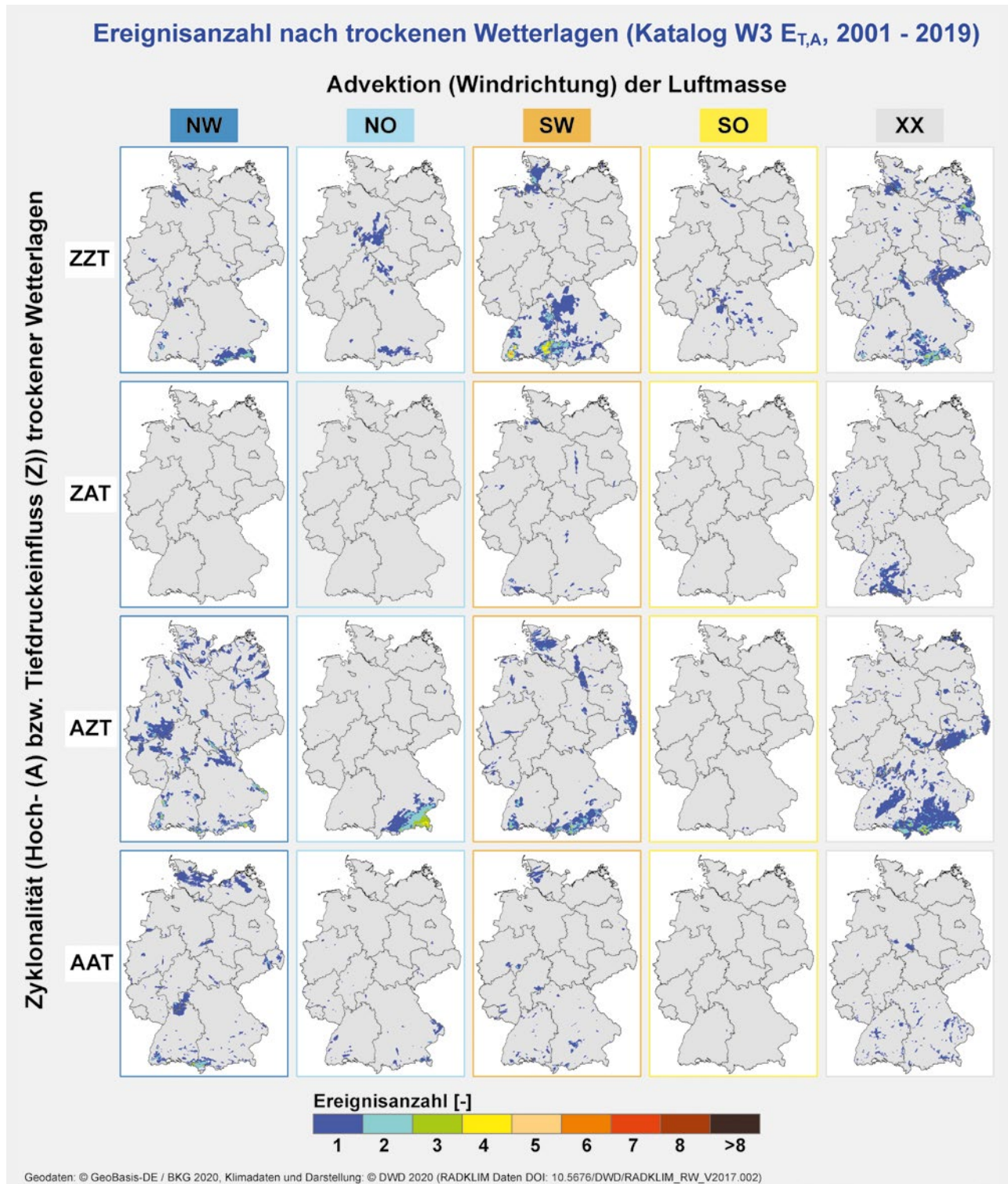


Abb. 32: Ereignisanzahl für die Jahre 2001 bis 2019 aufgeteilt nach den trockenen Wetterlagen der objektiven Wetterlagenklassifikation des DWD. Die Spalten geben die vorherrschende Strömungsrichtung und die Zeilen die Zyklonalität an.

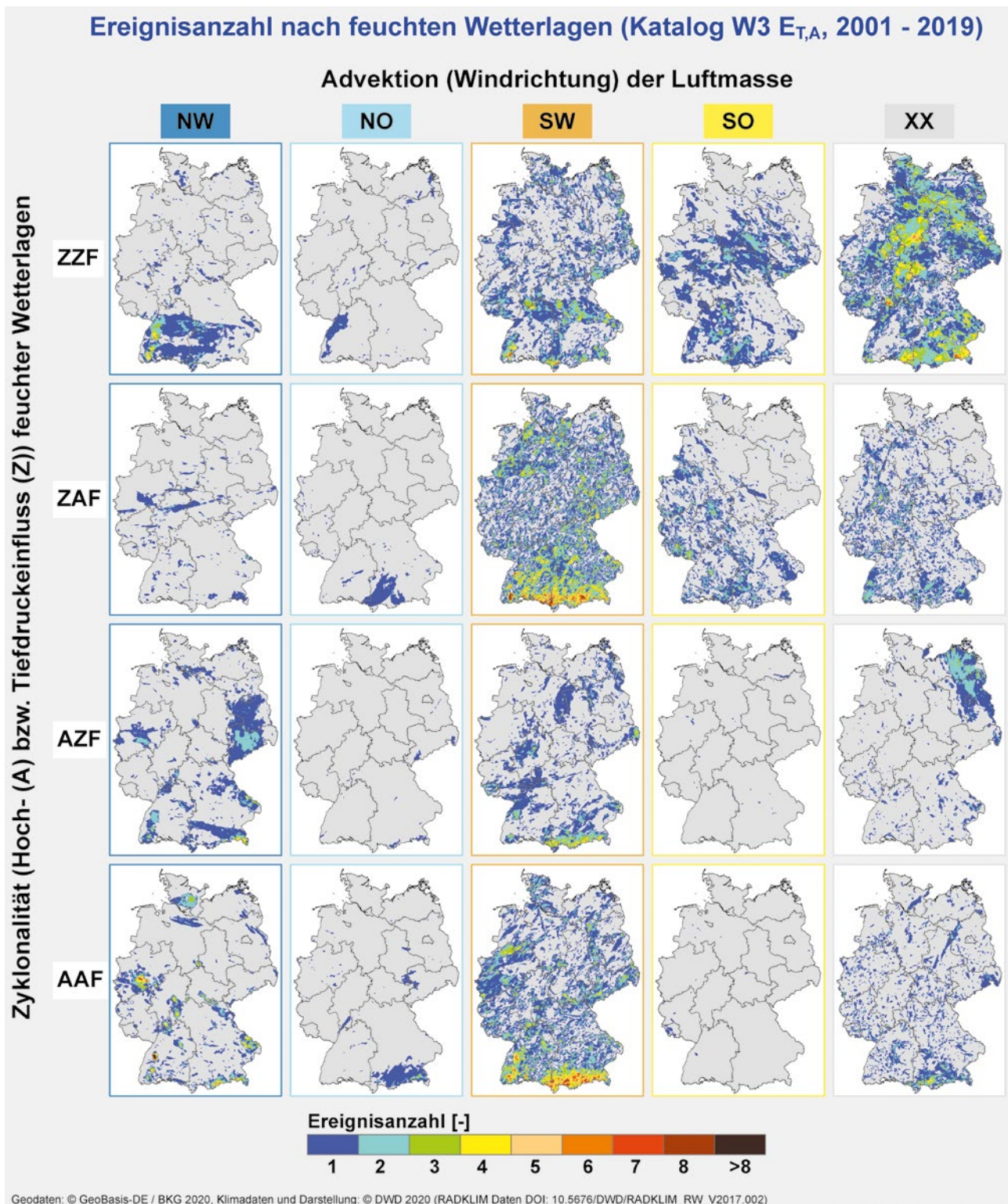


Abb. 33: wie Abbildung 32, aber für feuchte Wetterlagen.

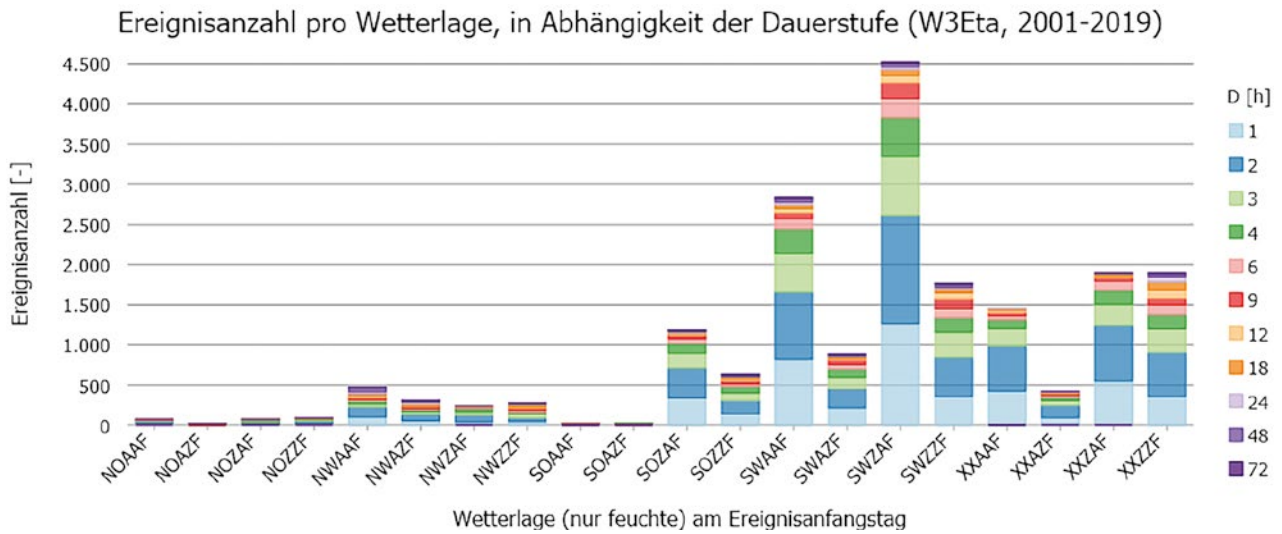


Abb. 34: Ereignisanzahl pro Wetterlage der objektiven Wetterlagenklassifikation des DWD für den Zeitraum 2001 bis 2019. Die charakteristischen Dauerstufen der Ereignisse sind farblich codiert.

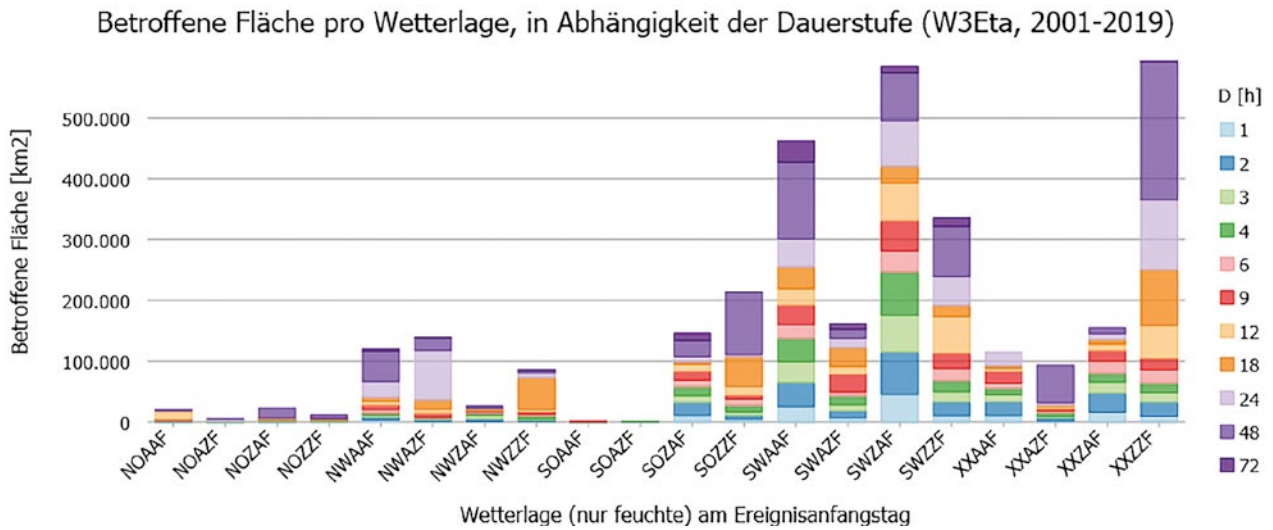


Abb. 35: Akkumulierte Ereignisfläche pro Wetterlage der objektiven Wetterlagenklassifikation des DWD für den Zeitraum 2001 bis 2019. Die charakteristischen Dauerstufen der Ereignisse sind farblich codiert.

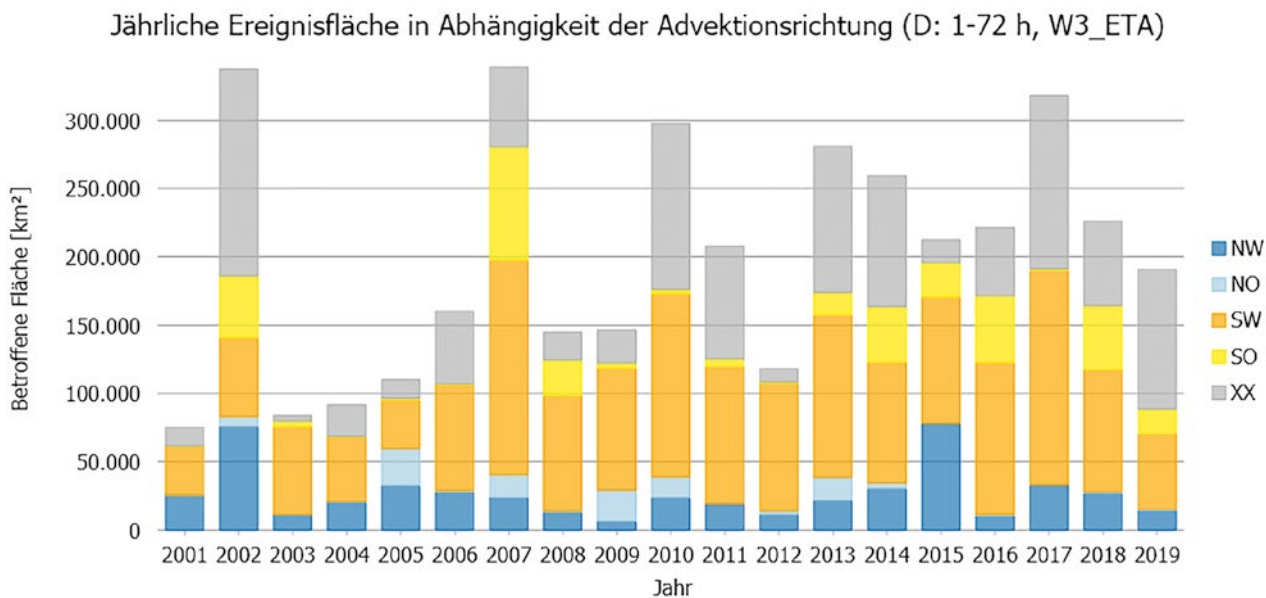


Abb. 36: Jährliche akkumulierte Ereignisfläche pro Jahr für alle Dauerstufen, farblich codiert nach Hauptanströmrichtung der OWLK.

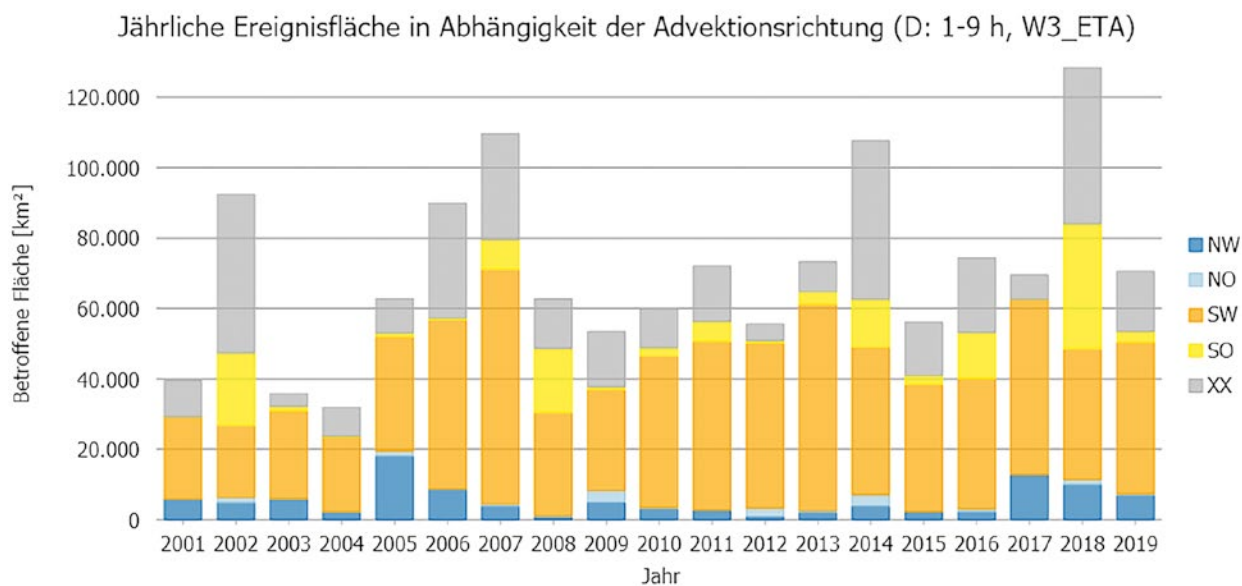


Abb. 37: Jährliche akkumulierte Ereignisfläche pro Jahr für kurze Dauerstufen von einer bis 9 Stunden, farblich codiert nach Hauptanströmrichtung der OWLK.

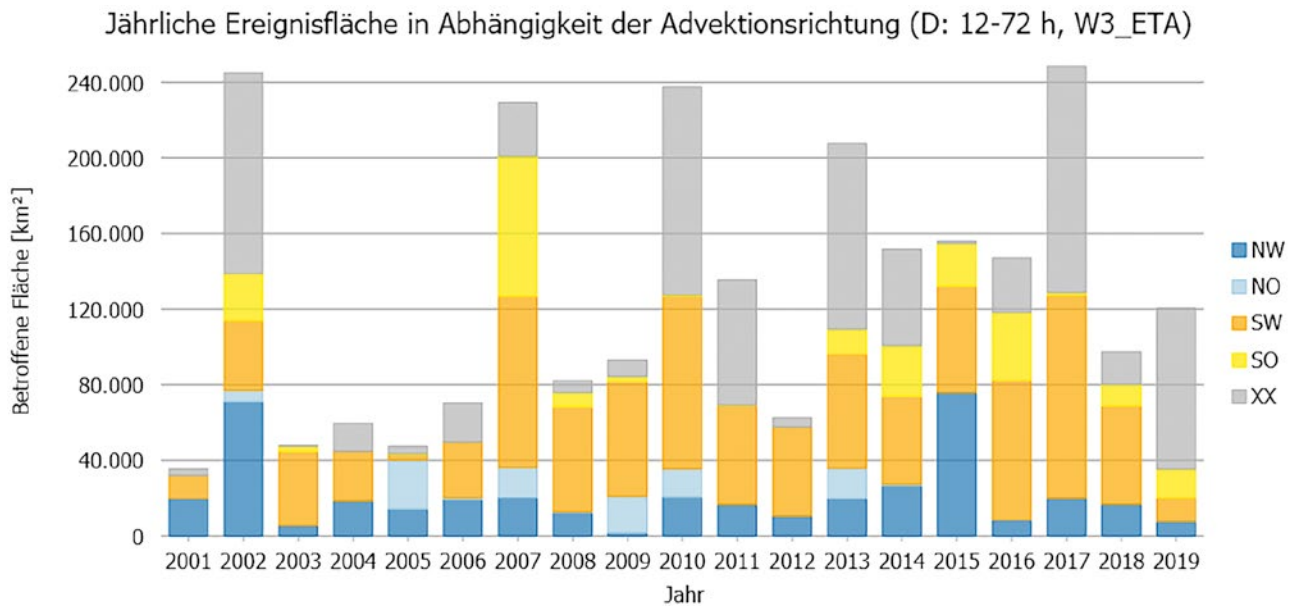


Abb. 38: Jährliche akkumulierte Ereignisfläche pro Jahr für lange Dauerstufen von 12 bis 72 Stunden, farblich codiert nach Hauptanströmrichtung der OWLK.

	Wetterlage	Ereignisanzahl	Betroffene Fläche [~km ²]	Anzahl der Tage mit mindestens einem Ereignis	Mittlere Ereignisanzahl pro Ereignistag	Mittlere betroffene Fläche pro Ereignistag	Mittlere betroffene Fläche pro Ereignis
feuchte Wetterlagen	NWZZF	277	86244	38	7	2269,6	311,4
	NWZAF	244	26482	14	17	1891,6	108,5
	NWAZF	309	139233	55	6	2531,5	450,6
	NWAAF	474	119598	102	5	1172,5	252,3
	NOZZF	93	12030	11	8	1093,6	129,4
	NOZAF	78	23282	4	20	5820,5	298,5
	NOAZF	23	5328	3	8	1776,0	231,7
	NOAAF	79	20882	12	7	1740,2	264,3
	SWZZF	1766	335870	156	11	2153,0	190,2
	SWZAF	4522	584970	265	17	2207,4	129,4
	SWAZF	881	161751	110	8	1470,5	183,6
	SWAAF	2838	462415	249	11	1857,1	162,9
	SOZZF	631	213858	38	17	5627,8	338,9
	SOZAF	1186	145718	55	22	2649,4	122,9
	SOAZF	27	1175	2	14	587,5	43,5
	SOAAF	21	1688	4	5	422,0	80,4
	XXZZF	1890	592968	94	20	6308,2	313,7
	XXZAF	1897	154531	67	28	2306,4	81,5
	XXAZF	421	93348	33	13	2828,7	221,7
	XXAAF	1453	115095	82	18	1403,6	79,2

Tab. 5: Auflistung ausgewählter Ereignisattribute in Abhängigkeit der vorherrschenden Wetterlage der OWLK des DWD. Die farblich hinterlegten Werte übertreffen das entsprechende Perzentil.

	Wetterlage	Ereignisanzahl	Betroffene Fläche [~km ²]	Anzahl der Tage mit mindestens einem Ereignis	Mittlere Ereignisanzahl pro Ereignistag	Mittlere betroffene Fläche pro Ereignistag	Mittlere betroffene Fläche pro Ereignis
trockene Wetterlagen	NWZZT	76	29723	24	3	1238,5	391,1
	NWZAT	3	97	2	2	48,5	32,3
	NWAZT	328	65910	100	3	659,1	200,9
	NWAAT	154	39711	54	3	735,4	257,9
	NOZZT	15	13157	4	4	3289,3	877,1
	NOZAT	0	0	0	0	0,0	0,0
	NOAZT	27	35986	9	3	3998,4	1332,8
	NOAAT	66	7312	16	4	457,0	110,8
	SWZZT	107	77651	29	4	2677,6	725,7
	SWZAT	45	5403	15	3	360,2	120,1
	SWZAT	158	53377	57	3	936,4	337,8
	SWAAT	89	9181	31	3	296,2	103,2
	SOZZT	41	7763	6	7	1293,8	189,3
	SOZAT	10	243	7	1	34,7	24,3
	SOZAT	3	130	1	3	130,0	43,3
	SOZAT	1	28	1	1	28,0	28,0
	XXZZT	175	58741	36	5	1631,7	335,7
	XXZAT	106	17300	14	8	1235,7	163,2
	XXAZT	284	92371	36	8	2565,9	325,3
	XXAAT	181	9194	25	7	367,8	50,8

Werte ≥ 75 p, ≥ 50 p, ≥ 25 p

Fortsetzung Tab. 5: Auflistung ausgewählter Ereignisattribute in Abhängigkeit der vorherrschenden Wetterlage der OWLK des DWD. Die farblich hinterlegten Werte übertreffen das entsprechende Perzentil.

5.3.2. Geoattribute

Der Ereigniskatalog erlaubt die Selektion der Ereignisse nach definierten Geoattributen. Einen potenziellen Einfluss auf die Entstehung von Extremereignissen besitzen Großstädte durch den in Kapitel 2.4 beschriebenen Stadtklimaeffekt, der bereits in vielen Studien für die Niederschlagsmenge beschrieben wurde.

5.3.2.1. Urbanisierung – Der Stadtklimaeffekt

Untersucht wurde ein potenzieller Stadtklima-effekt der Stadt Bremen. Bremen liegt in der norddeutschen Tiefebene und weist keine starken topografischen Unterschiede im Umland auf. Einschränkend ist die Nähe zur Nordsee im Norden sowie zur Stadt Hamburg im Nordosten. Da Bremen in der betrachteten Zeitspanne von 2001 bis 2019 kein Radarstandort war, ist die Qualität der Radardaten im Stadtbereich als gut

anzusehen, wenngleich in den Jahren 2018 und 2019 die Informationen des Radars Emden nicht mehr zur Verfügung standen. Abbildung 39 zeigt das Untersuchungsgebiet. Dabei wurden um die Stadt Bremen – der Bremer Hafen wurde ausgenommen – Pufferzonen mit einem Abstand von 15 Kilometern erstellt und die resultierenden ringförmigen Flächen in Segmente entsprechend der Himmelsrichtung unterteilt. Die Ereignisdaten wurden pro Segment ausgewertet. Um einen Vergleich zu ermöglichen, wurden die Ereignisanzahlen (Anzahl Ereignisse, deren Flächen sich mit dem betrachteten Segment schneiden) sowie -flächen (Summe der Ereignisflächen innerhalb des betrachteten Segments) entsprechend den Flächenanteilen der jeweiligen Segmente skaliert. Farblich dargestellt ist der Urban Heat Island (UHI) Index als Maßzahl für die Urbanisierung.

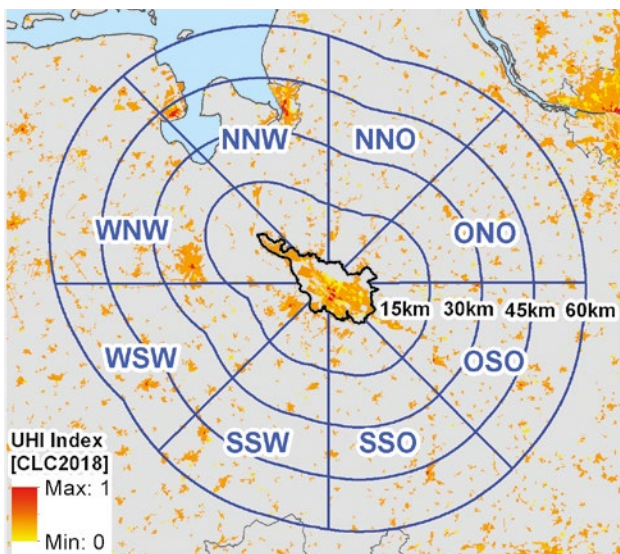


Abb. 39: Einteilung der Stadt Bremen und Umgebung in Segmenten entsprechend der Himmelsrichtung und Entfernung von der Stadtgrenze. Farblich dargestellt ist der Urban Heat Island (UHI) Index als Maß für die Urbanisierung.

Abbildungen 40 und 41 zeigen die relativen Ereigniszahlen und -flächen für die jeweiligen Hauptanströmrichtungen der vorherrschenden Wetterlagen für Starkregenereignisse der Dauerstufen bis

9 Stunden sowie Dauerregenereignisse mit Dauerstufen von 12 bis 72 Stunden. Während die Ereignisanzahlen kein eindeutiges Muster aufweisen, erkennt man bei Betrachtung der Ereignisflächen im Fall der Starkregenereignisse kurzer Dauerstufen eine Erhöhung im Lee der Stadt. Insbesondere bei nordwestlicher Anströmung ist ein Maximum im SSO-Segment zu erkennen, wobei die Ereignisflächendichte mit der Entfernung zur Stadt abnimmt. Bei SO-Anströmung ist der Flächenanteil in Richtung WNW erhöht. Auch treffen bei diesen Wetterlagen vergleichsweise viele Ereignisse das Stadtgebiet selbst. Bei SW-Lagen ist der Lee-Effekt weniger deutlich ausgeprägt. NO-Lagen treten insgesamt nur sehr selten in Zusammenhang mit Extremereignissen auf (nur 4 Segmenttreffer bei Starkregen, kein Dauerregenereignis). Ein großer Anteil der Extremereignisse entfällt auf Wetterlagen mit unklarer Anströmrichtung (XX).

Tabelle 6 enthält die Ereignisanzahlen sowie -flächen für die jeweiligen untersuchten Segmente aufgeteilt nach der Hauptanströmrichtung entsprechend der OWLK. Neben der bereits erwähnten Anströmrichtung aus NO sind auch die Ereigniszahlen für die Anströmrichtungen NW und SO im Untersuchungszeitraum noch relativ gering.

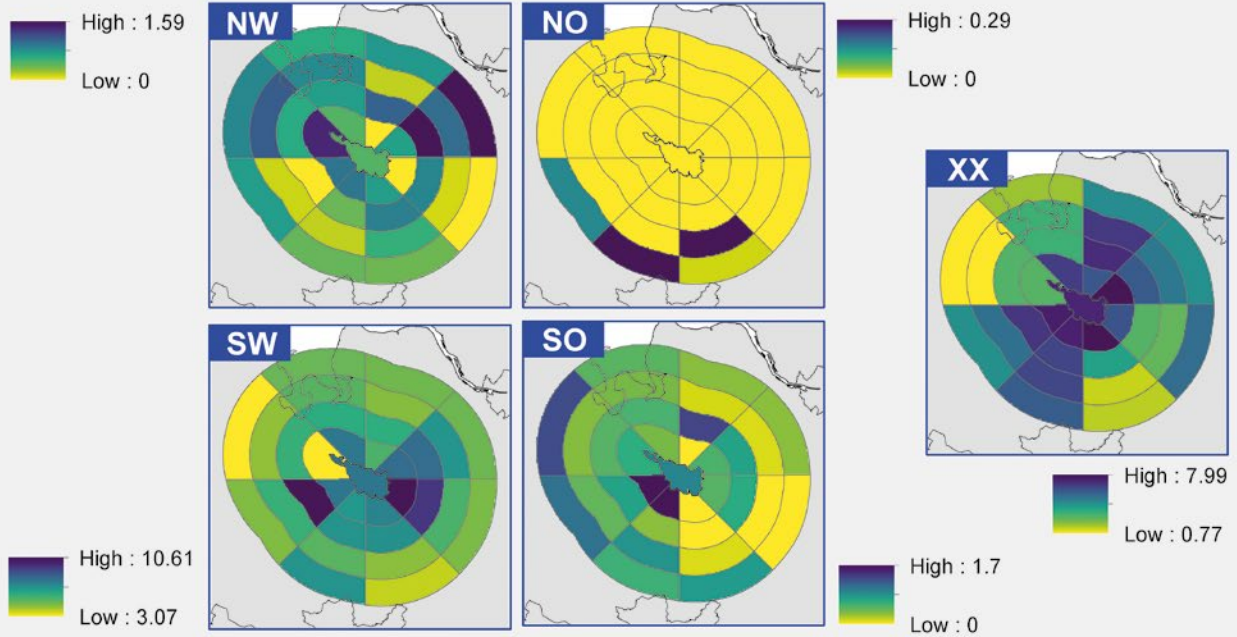
Betrachtet man die räumliche Verteilung für Dauerregenereignisse von 12 bis 72 Stunden charakteristischer Andauer, stellt man fest, dass sich insbesondere bei NW- sowie SO-Anströmung höhere Werte linksseitig der Stadt Bremen zeigen. Diese Effekte sind vermutlich auf großflächigere Einflüsse zurückzuführen, z. B. die Nähe zur Küste bei nordwestlicher Wetterlage.

Insgesamt deuten die Ergebnisse auf ein erhöhtes Auftreten von Starkregenereignissen kurzer Dauerstufen im Lee der Stadt Bremen hin. Um diese Beobachtung ursächlich einem klimatologischen Stadteffekt zuzuordnen, sind jedoch umfangreichere Analysen notwendig. Eine Erhöhung der Starkregentätigkeit innerhalb des Stadtgebiets konnte nicht festgestellt werden.

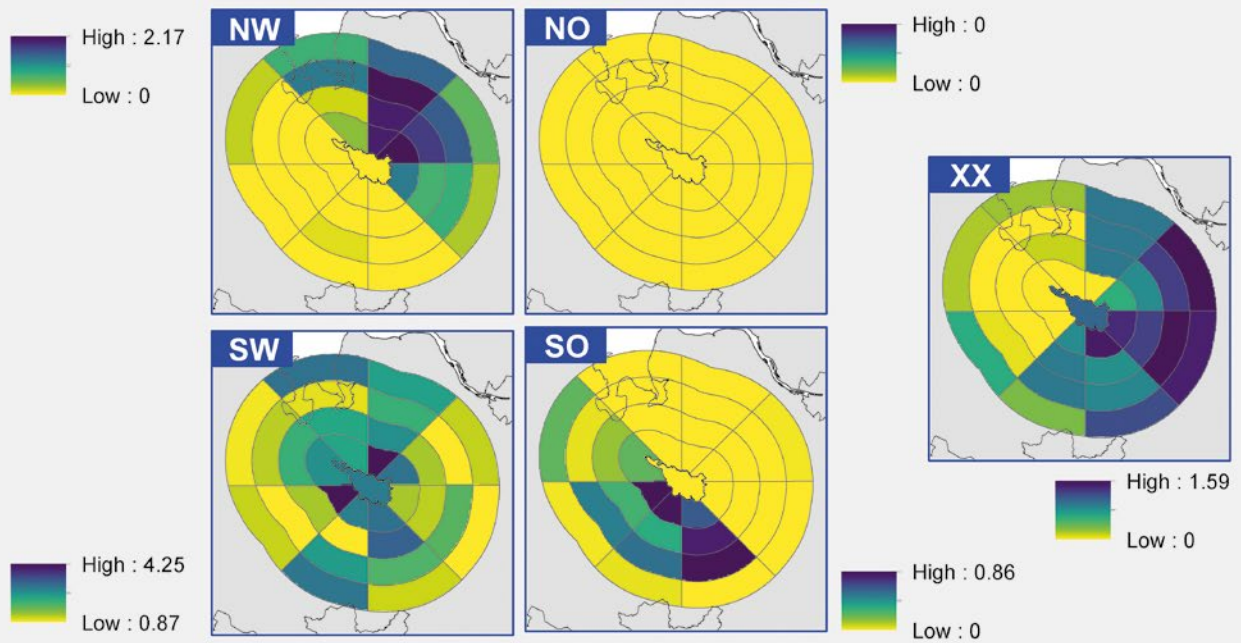
Relative Ereignisanzahl in Abhängigkeit der Entfernung von der Stadt und Wetterlagen Anströmrichtung (DWD WLK)

Ereignisbasierte Analyse: W3 E_{T,A} Katalog, 2001-2019

STARKREGEN (D: 1-9 St.)



DAUERREGEN (D: 12-72 St.)



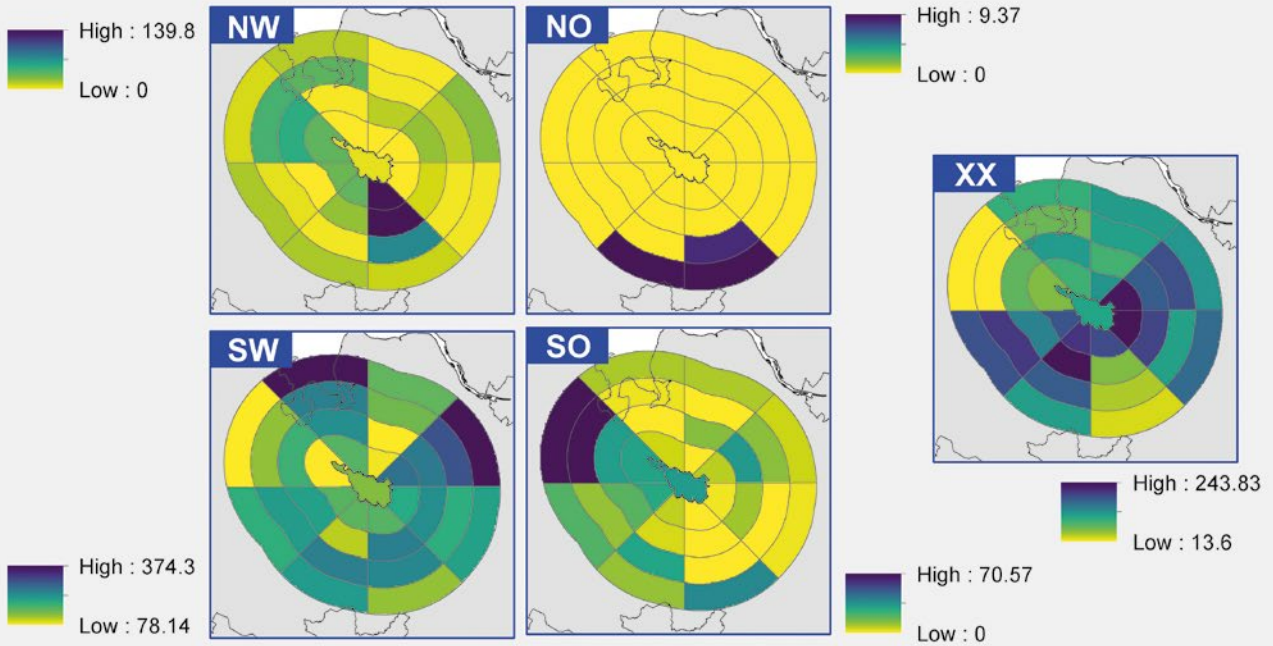
Geodaten: © GeoBasis-DE / BKG 2020, Klimadaten und Darstellung: © DWD 2021 (RADKLIM Daten DOI: 10.5676/DWD/RADKLIM_RW_V2017.002)

Abb. 40: Skalierte Ereignisanzahlen pro Segment in Abhängigkeit der Anströmrichtung der objektiven Wetterlagenklassifikation für Starkregen (oben) und Dauerregenereignisse (unten).

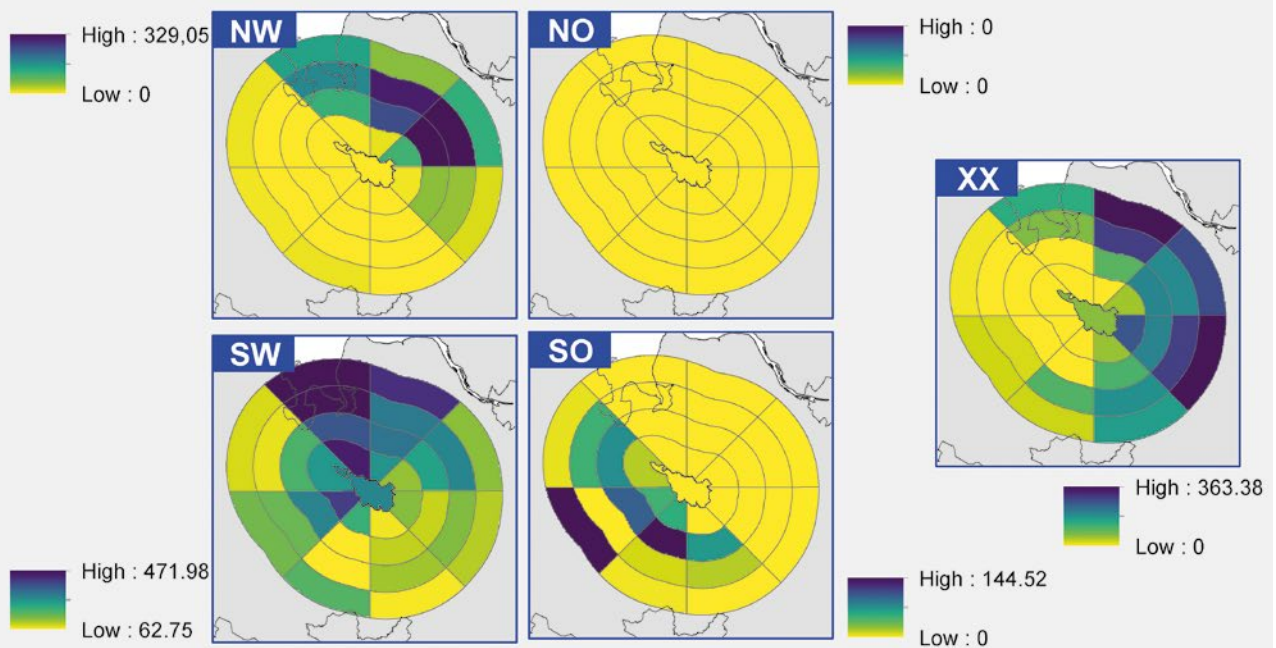
Relative Ereignisfläche in der Abhängigkeit der Entfernung von der Stadt und Wetterlagen Anströmrichtung (DWD WLK)

Ereignisbasierte Analyse: W3 E_{T,A} Katalog, 2001-2019

STARKREGEN (D: 1-9 St.)



DAUERREGEN (D: 12-72 St.)



Geodaten: © GeoBasis-DE / BKG 2020, Klimadaten und Darstellung: © DWD 2021 (RADKLIM Daten DOI: 10.5676/DWD/RADKLIM_RW_V2017.002)

Abb. 41: Skalierte Ereignisflächen pro Segment in Abhängigkeit der Anströmrichtung der objektiven Wetterlagenklassifikation für Starkregen (oben) und Dauerregenerenignisse (unten).

				STARKREGEN 1 bis 9 Std.								
				Absolute Ereignisanzahl [-]					Absolute Ereignisfläche [km²]			
Sektor	Entfernung	Sektorfläche [km²]	Sektorfläche Relative [%]	Alle	NW	NO	SW	SO	XX	Alle	NW	NO
Bremen	0 km (Stadt)	340,8	2,0	31	1	0	15	2	13	530,7	13,6	0,0
NNW	15 km	340,4	2,0	29	1	0	15	1	12	481,7	0,2	0,0
	30 km	516,0	3,0	31	2	0	18	2	9	969,1	9,4	0,0
	45 km	684,9	3,9	38	3	0	21	2	12	1281,6	145,4	0,0
	60 km	857,8	4,9	40	3	0	25	3	9	2152,7	75,1	0,0
NNO	15 km	188,4	1,1	12	0	0	6	0	6	231,8	0,0	0,0
	30 km	375,7	2,2	32	2	0	13	3	14	434,0	32,0	0,0
	45 km	560,4	3,2	37	1	0	15	1	20	10,7	10,7	0,0
	60 km	741,3	4,3	44	3	0	21	2	18	12,9	12,9	0,0
ONO	15 km	263,2	1,5	25	1	0	12	1	11	702,1	2,2	0,0
	30 km	416,3	2,4	37	3	0	19	2	13	1064,3	53,0	0,0
	45 km	590,6	3,4	43	3	0	23	1	16	1569,9	50,0	0,0
	60 km	765,1	4,4	49	7	0	22	2	18	2303,2	110,5	0,0
OSO	15 km	278,8	1,6	27	0	0	17	1	9	683,3	0,0	0,0
	30 km	446,9	2,6	35	2	0	24	2	7	1050,9	23,5	0,0
	45 km	624,8	3,6	30	1	0	20	0	9	1025,5	12,5	0,0
	60 km	802,9	4,6	47	1	0	22	1	23	1615,4	18,0	0,0

Tab. 6: Auflistung aller Ereignisse pro Sektor aufgeteilt nach der Hauptanströmrichtung der OWLK zur Untersuchung des Stadteffekts Bremen.

			DAUERREGEN 12 bis 72 Std.											
			Absolute Ereignisanzahl [-]						Absolute Ereignisfläche [km ²]					
SW	SO	XX	Alle	NW	NO	SW	SO	XX	Alle	NW	NO	SW	SO	XX
256,5	56,0	204,6	7	0	0	5	0	2	638,1	0,0	0,0	511,3	0,0	126,9
300,4	9,2	171,9	5	1	0	4	0	0	782,8	10,6	0,0	772,2	0,0	0,0
619,2	2,0	338,5	8	2	0	6	0	1	1288,9	312,1	0,0	957,1	0,0	19,7
866,3	8,0	262,0	10	5	0	4	0	1	2557,0	642,6	0,0	1639,0	0,0	275,3
1585,5	38,3	453,8	19	4	0	13	0	2	3637,7	639,9	0,0	2326,0	0,0	671,8
102,2	0,0	129,5	6	2	0	4	0	0	273,3	14,0	0,0	259,3	0,0	0,0
195,6	24,2	182,2	11	4	0	5	0	2	1325,7	499,6	0,0	613,1	0,0	213,0
451,1	2,6	351,9	16	7	0	6	0	3	2740,8	918,5	0,0	888,7	0,0	933,6
628,5	32,6	481,0	19	6	0	9	0	4	3352,6	229,6	0,0	1575,3	0,0	1547,6
354,5	9,5	335,9	8	3	0	4	0	1	416,3	152,4	0,0	187,4	0,0	76,5
543,1	69,9	398,3	9	4	0	3	0	2	1773,9	787,0	0,0	520,2	0,0	466,7
885,2	36,0	598,6	12	5	0	3	0	4	2557,9	1031,9	0,0	885,9	0,0	640,2
1645,2	22,2	525,3	16	3	0	5	0	7	2268,0	484,9	0,0	561,5	28,5	1193,1
289,9	2,9	390,5	6	2	0	2	0	2	642,3	14,6	0,0	212,0	0,0	415,6
530,4	21,7	475,3	8	2	0	3	0	3	900,4	130,6	0,0	257,2	0,0	512,6
627,2	0,0	385,8	14	3	0	6	0	5	1692,2	169,7	0,0	484,4	0,0	1038,2
869,6	10,0	717,8	13	2	0	4	1	6	2242,7	82,1	0,0	496,3	28,7	1635,7

				STARKREGEN 1 bis 9 Std.								
				Absolute Ereignisanzahl [-]					Absolute Ereignisfläche [km ²]			
Sektor	Entfernung	Sektorfläche [km ²]	Sektorfläche Relative [%]	Alle	NW	NO	SW	SO	XX	Alle	NW	NO
SSO	15 km	261,3	1,5	24	1	0	11	0	12	708,7	209,8	0,0
	30 km	429,8	2,5	28	2	0	17	0	9	1029,9	341,5	0,0
	45 km	605,3	3,5	25	2	1	16	1	5	1176,2	257,2	27,6
	60 km	780,7	4,5	32	2	1	18	4	7	936,5	51,2	42,0
SSW	15 km	207,0	1,2	19	1	0	8	2	8	462,6	42,3	0,0
	30 km	381,6	2,2	30	1	0	15	1	13	801,4	48,5	0,0
	45 km	559,8	3,2	40	1	0	17	3	19	1347,7	12,0	0,0
	60 km	738,3	4,2	58	2	1	29	3	23	1452,4	74,6	37,9
WSW	15 km	204,6	1,2	20	1	0	9	2	8	448,0	38,0	0,0
	30 km	416,5	2,4	42	0	0	25	2	15	818,3	0,0	0,0
	45 km	597,0	3,4	40	1	0	20	2	17	1384,0	21,8	0,0
	60 km	773,0	4,4	48	3	1	21	5	18	1706,3	78,5	2,7
WNW	15 km	456,9	2,6	21	3	0	9	2	7	520,6	96,5	0,0
	30 km	562,2	3,2	32	2	0	19	2	9	1035,4	171,0	0,0
	45 km	731,2	4,2	29	4	0	19	2	4	1069,6	186,4	0,0
	60 km	906,7	5,2	31	4	0	16	7	4	937,6	44,5	0,0

Fortsetzung Tab. 6: Auflistung aller Ereignisse pro Sektor aufgeteilt nach der Hauptanströmrichtung der OWLK zur Untersuchung des Stadteffekts Bremen.

			DAUERREGEN 12 bis 72 Std.											
			Absolute Ereignisanzahl [-]						Absolute Ereignisfläche [km ²]					
SW	SO	XX	Alle	NW	NO	SW	SO	XX	Alle	NW	NO	SW	SO	XX
230,7	0,0	268,1	7	0	0	4	1	2	205,0	0,0	0,0	120,6	0,4	84,0
549,2	0,0	140,2	11	0	0	7	2	2	666,1	0,0	0,0	252,5	138,0	275,7
742,8	0,6	148,0	12	0	0	6	3	3	1090,1	0,0	0,0	407,2	59,1	623,7
563,7	147,7	131,9	10	0	0	5	0	5	1071,5	0,0	0,0	347,7	0,0	723,7
179,3	7,0	234,0	5	0	0	3	1	1	279,9	0,0	0,0	225,9	53,9	0,1
244,8	8,8	499,3	5	0	0	2	1	2	483,2	0,0	0,0	161,3	316,8	5,1
716,4	82,6	536,7	13	1	0	7	2	3	582,9	3,7	0,0	201,8	39,9	337,6
829,2	41,4	469,4	15	1	0	11	1	2	914,9	47,3	0,0	715,2	33,3	129,1
178,8	29,0	202,3	6	0	0	5	1	0	464,7	0,0	0,0	416,2	48,5	0,0
453,7	41,1	323,5	4	0	0	3	1	0	826,5	0,0	0,0	631,7	194,8	0,0
665,6	33,0	663,7	6	0	0	3	2	1	620,3	0,0	0,0	518,2	21,4	80,7
770,6	80,4	774,1	10	1	0	5	1	3	1309,7	37,7	0,0	639,4	509,4	123,2
205,1	69,1	149,8	7	0	0	6	1	0	655,7	0,0	0,0	611,8	43,9	0,0
539,3	89,7	235,4	7	0	0	6	1	0	768,1	0,0	0,0	569,7	198,4	0,0
529,7	296,4	57,1	7	1	0	5	1	0	541,9	13,4	0,0	353,7	174,8	0,0
474,9	320,8	97,4	11	2	0	5	2	2	652,9	56,9	0,0	475,8	49,0	71,1



Quelle: pixabay/Capri23auto

Einsatzdaten – Erfassung und Analyseoptionen

Eines der primären Projektziele bestand darin, die entwickelte Ereignisdefinition und den daraus hervorgehenden Ereigniskatalog auf Anwendbarkeit im vorbeugenden Katastrophenschutz zu prüfen, um hieraus Aussagen über den Zusammenhang zwischen Starkregenereignissen und dem Einsatzgeschehen ableiten zu können. Hierfür ist ein Vergleich der Niederschlagsdaten mit Einsatzdaten von Organisationen der nicht-polizeilichen Gefahrenabwehr wesentlich. Da der Hauptfokus bei der Bewältigung dieser Ereignisse bei den Feuerwehren liegt, kommt der Eignung ihrer Einsatzdaten für die Verknüpfung mit meteorologischen Daten eine besondere Bedeutung zu. Über eine Onlineerhebung unter Kommunen konnten zunächst zahlreiche Erkenntnisse zur Erfassung unwetterbedingter Einsätze gewonnen werden, die in Kapitel 6.1 dargelegt werden. Im Anschluss beschreibt Kapitel 6.2 die angewandte Methodik zur Verknüpfung von Einsatz- und Ereignisdaten anhand zur Verfügung gestellter Einsatzdatensätze der Feuerwehr. Ergänzend wurde im Rahmen einer projektbegleitenden Bachelorarbeit die gemeinsame Analyse von Niederschlagsdaten und Einsatzdaten des THW untersucht, deren Ergebnisse summarisch in Kapitel 6.3 dargelegt werden.

6.1. Untersuchung angewandter Dokumentationsweisen unwetterbedingter Einsätze

Mit der Untersuchung der angewandten Verfahren zur Einsatzdokumentation wurde die Grundlage für die Zusammenhangsanalyse von Niederschlagsereignissen und korrespondierenden Einsätzen geschaffen. Das Ziel der Untersuchung war es, zunächst einen Überblick über Gemeinsamkeiten und Unterschiede in der Einsatzerfassung der Feuerwehren innerhalb Deutschlands zu gewinnen und hierüber zu ermitteln, inwieweit die auf diese Weise generierten Einsatzdaten eine Verknüpfung mit Niederschlagsdaten erlauben.

Realisiert wurde diese Analyse über eine Befragung von Kommunen mittels eines Onlinefragebogens, der über den „Ausschuss Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile

Verteidigung“ des Arbeitskreises V der Ständigen Konferenz der Innenminister und -senatoren der Länder (AFKzV) an die Länder gereicht und von dort aus an die zuständigen oberen und unteren Katastrophenschutzbehörden weitergeleitet wurde. Insgesamt wurde der Fragebogen von 182 Teilnehmenden aus 10 der 16 Länder vollständig beantwortet; Abbrüche der Befragung gab es keine. Die Anzahl der Rückläufe variierte zum Teil stark zwischen den einzelnen Ländern. Die meisten Antworten kamen aus Bayern, gefolgt von Baden-Württemberg und Sachsen sowie Nordrhein-Westfalen. Auch aus dem Saarland und aus Brandenburg gingen einige Rückläufe ein. In den Stadtstaaten Berlin und Bremen sowie in Thüringen und Hessen wurde der Fragebogen jeweils einmal beantwortet.

Bei der Zugehörigkeit nach Einrichtung zeigte sich ein hoher Anteil von insgesamt 63 % der Antworten aus Einrichtungen der Berufs- und Freiwilligen Feuerwehr. Ein Drittel der Rückläufe stammte aus der Kommunalverwaltung, weitere 6 % aus sonstigen Einrichtungen wie Kreisverwaltungen, Landratsämtern oder Integrierten Leitstellen. Unabhängig von der Zugehörigkeit hat eine überragende Mehrheit von 93 % der Teilnehmenden nach eigenen Angaben bereits Erfahrungen mit einsatzverursachenden Starkregenereignissen gemacht.

Die Ergebnisse wurden im Zwischenbericht zum Projekt detailliert ausgeführt (vgl. NIKOGOSIAN et al. 2020). Im Folgenden werden nochmals die wichtigsten Punkte zusammengefasst und durch Erläuterungen ergänzt.

» **Papierbasierte und elektronische Einsatzerfassung nahezu gleichermaßen relevant, zahlreiche unterschiedliche Eingabesysteme**

Hinsichtlich der Art und Weise, wie Einsätze gegenwärtig in den Einrichtungen dokumentiert werden, zeigte sich eine klare Konzentration auf der händischen, d. h. in der Regel über Papierformulare erfolgenden, sowie auf der elektronischen, d. h. programmgestützten, Einsatzdatenerfassung (vgl. Abbildung 42). Die Verwendung von Apps oder Diktiergeräten findet hingegen kaum

Anwendung. Nicht ungewöhnlich scheint dabei eine Kombination aus händischer und elektronischer Erfassung, die von einem Viertel der Teilnehmenden angegeben wurde und offenbar häufig folgende Form annimmt: *„Bislang werden bei uns die Einsätze bei Großschadenslagen noch im ersten Moment händisch erfasst, sobald die Chaosphase vorbei ist, werden sie dann in entsprechende Exceltabellen eingepflegt.“*

Demgegenüber werden Einsätze bei der Hälfte der Antwortenden (52 %) ausschließlich elektronisch erfasst, während von knapp einem Fünftel (17 %) gar keine elektronischen Systeme verwendet werden. Aus diesem Ergebnis lässt sich schließen, dass zwischen den Einrichtungen zum Teil große Unterschiede im Digitalisierungsgrad der Einsatzdatenerfassung bestehen, die sich zum Teil durch zur Verfügung stehende Mittel (bspw. für computertechnische Ausstattung oder Personal, das die

Daten einpflegt) erklären lassen dürften, zum Teil aber auch durch unterschiedliche Notwendigkeiten und Vorgaben, Daten z. B. für die Erstellung von Statistiken an übergeordnete Behörden übermitteln zu müssen. Ohne solche Vorgaben scheint es allein im Interesse der Einrichtungen zu liegen, ihre Daten z. B. für interne Zwecke oder Auswertungen in digitaler Form zu sammeln und aufzubereiten. Einschränkend muss aber auch hinzugefügt werden, dass die Teilnehmenden ihre Antworten in unterschiedlicher Zuständigkeit übermittelt haben. Mitglieder der Feuerwehren, insbesondere der Freiwilligen Feuerwehren, haben in der Regel keinen direkten Zugriff auf die Einsatzleitsysteme, weil diese in der Verantwortung der Leitstellen gepflegt werden. Demzufolge bleibt das Einsatztagebuch oder der schriftliche Einsatzbericht das alleinige Mittel der Wahl, sofern kein Bestreben besteht, Einsätze für interne Auswertungen digital zu dokumentieren.

Form der Einsatzdokumentation

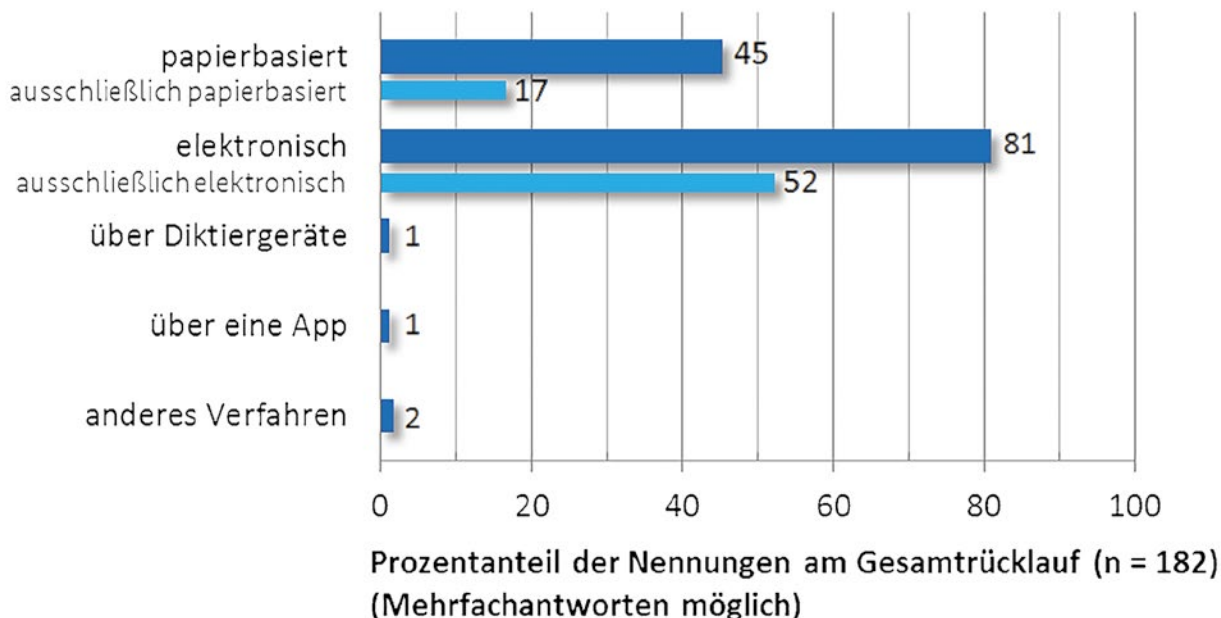


Abb. 42: Formen der aktuell angewendeten Verfahren zur Einsatzdokumentation.

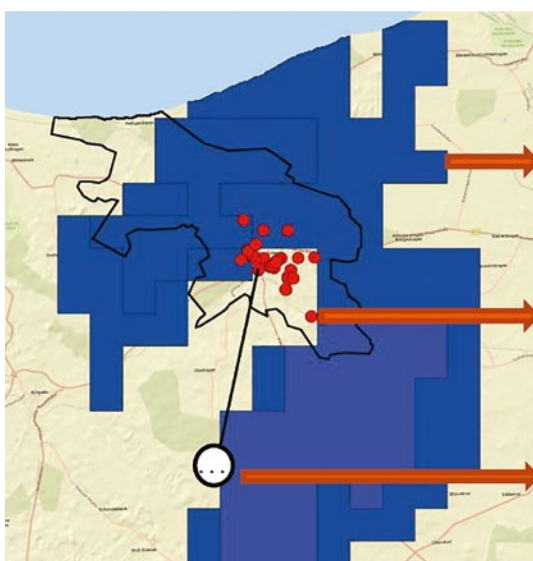
Deutlich wurde anhand einiger Aussagen, dass sich viele Einrichtungen offenbar momentan in einer Art Übergangsphase befinden, in der zwar noch auf eine bewährte Art und Weise dokumentiert wird, Neuerungen jedoch in Planung oder bereits in der Umsetzung sind. Auch die vergangenen Jahre waren bei mehr als der Hälfte der Einrichtungen durch Umstrukturierungen geprägt: 55 % gaben an, dass innerhalb der letzten Dekade eine Änderung in der Art der Einsatz erfassung stattgefunden habe. Davon fand ein Großteil der Neuerungen im Hinblick auf die elektronische Erfassung statt, wobei entweder von der papierbasierten auf die elektronische Einsatzdokumentation oder von einem bestehenden auf ein anderes Eingabesystem umgestellt wurde. Weitere Änderungen betrafen die Einführung neuer Einsatzstichworte, häufig einhergehend mit Änderungen in der zugrunde liegenden Verordnung und/oder strukturellen Änderungen wie der Zusammenführung von Leitstellen oder der Einführung neuer Einsatzplanungen für die Optimierung der Einsatzabläufe bei Unwetter.

Aufgrund der absehbaren künftig weiter wachsenden Bedeutung der elektronischen Eingabesysteme und um noch detailliertere Aussagen über die Vergleichbarkeit von bundesweit erfassten Einsatzdaten treffen zu können, wurde zudem nach den verwendeten Eingabesystemen gefragt. Von

den 147 Einrichtungen, die angaben, elektronische Systeme für die Einsatzdatenerfassung zu benutzen, wurden insgesamt 31 unterschiedliche Eingabesysteme genannt (vgl. Zwischenbericht), d. h., dass von den teilnehmenden Institutionen rund jede fünfte ein anderes elektronisches Eingabeprogramm verwendet. Darunter befinden sich zu zwei Dritteln branchenspezifische Programme wie Einsatzleitsysteme oder Verwaltungssoftware für Feuerwehren sowie zu einem Drittel branchenübergreifend verwendete Systeme wie Microsoft Office-Programme. Hierbei muss angemerkt werden, dass der hohe Anteil branchenspezifischer Systeme auch aufgrund der hohen Teilnehmerzahl aus Bayern zustande kam, wo ein landesweites Einsatzleitsystem verwendet wird. Umso bemerkenswerter ist die Tatsache, dass sich unter den genannten branchenspezifischen Systemen immer noch 25 unterschiedliche Programme befinden.

» Unterschiedliche Zählweise von Einsätzen

Extreme Wetterereignisse gehen oft mit einer hohen Anzahl an Notrufen und dadurch ausgelösten Einsätzen einher. Die Zählung und Eintragung „eines Einsatzes“ unterscheidet sich allerdings zwischen den Einrichtungen. Im Vorlauf der Befragung wurden im Wesentlichen 3 verschiedene Zählarten identifiziert, die sich im Ergebnis auch bestätigten. So wird zum Teil jede ausrückende



Was gilt als „ein Einsatz“ in der Datenbank? Möglichkeiten zur Definition

1. ein Eintrag für das gesamte Ereignis
alle Einsatzstellen und ausrückten Einheiten werden unter einem Eintrag/Einsatzbericht subsummiert
2. ein Eintrag für jede Einsatzstelle
jede Einsatzstelle zu dem Ereignis erhält einen eigenen Eintrag, unabhängig von der Zahl der Einheiten
3. ein Eintrag für jede taktische Einheit
jede ausrückende Einheit erhält einen Eintrag

Abb. 43: Möglichkeiten zur Definition eines Einsatzes.

Einheit separat vermerkt und als „Einsatz“ gezählt, wohingegen andere Einrichtungen unabhängig von der Zahl der taktischen Einheiten jede Einsatzstelle als „einen Einsatz“ werten (vgl. Abbildung 43). In anderen Fällen werden sämtliche Einsatzstellen und eingesetzten Einheiten unter einem Eintrag oder Bericht subsummiert, wobei die Angaben zur Anzahl und Lokalisation der einzelnen Einsatzstellen mal mehr, mal weniger genau ausfallen. Die Zählweise bzw. Definition eines Einsatzes hat demnach – analog zur Ereignisdefinition – eine Auswirkung auf die Zahl der Einträge in den Einsatzdaten und somit auch auf die Angaben zur Einsatzbelastung aufgrund eines Ereignisses oder Ereignistyps. Nur wenn der Eintragung neuer Einsätze ein weitestgehend einheitliches Begriffsverständnis zugrunde liegt,

lassen sich Einsatzzahlen verschiedener Kommunen miteinander vergleichen und Veränderungen in den Einsatzzahlen über die Jahre ablesen.

Mehrheitlich wurde von den Befragungsteilnehmenden angegeben, dass für jede Einsatzstelle ein eigener Eintrag in der Einsatzdatenbank angelegt werde (vgl. Abbildung 44). 13 % dokumentieren dagegen jede ausrückende Einheit gesondert, während 12 % nur einen Eintrag für das gesamte Ereignis vornehmen. Darüber hinaus gibt es verschiedene Zwischenformen, z. B. dass „zunächst jede Einsatzstelle als ein Einsatz gewertet und gezählt [wird] inkl. der eingesetzten Kräfte, im Verlauf dann die Flächenlage ausgerufen [wird] (auch dann wird jeder Einsatz gezählt), aber in der Summe dann nur als ein Einsatz gewertet [wird].“

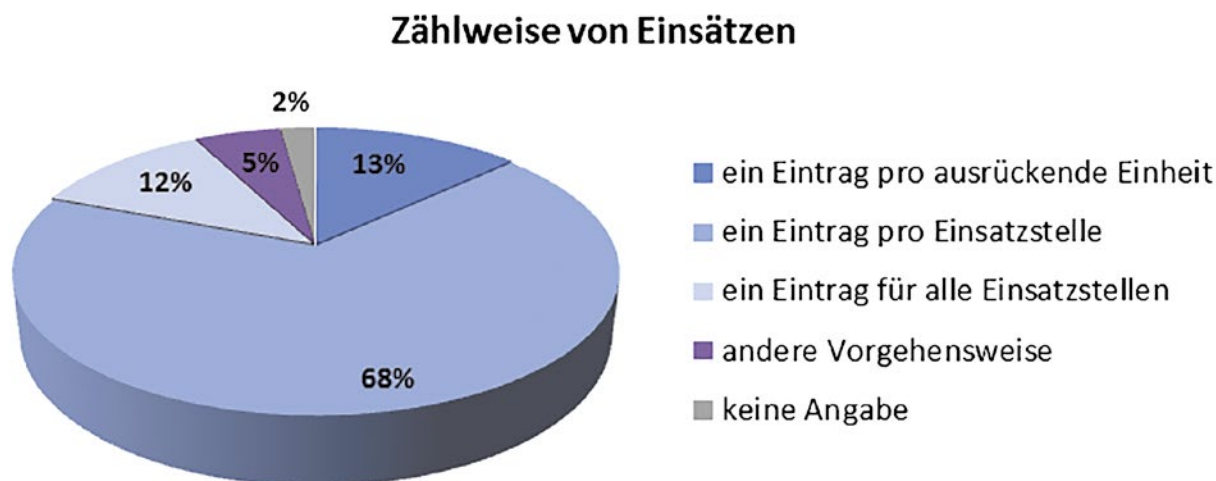


Abb. 44: Zählweise von Einsätzen.

Bei der Frage nach den Ursachen der gezeigten Unterschiede in der Zählung von Einsätzen kommen verschiedene Gründe zum Tragen. Im Rahmen des Projekts wurden die folgenden Punkte identifiziert:

1. **Unterschiedliche Vorgaben in den Alarmierungs- und Sondereinsatzplanungen:** Das Anlegen neuer Einsätze ist eng mit der geregelten Alarmierung der zuständigen Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS), die für die Abarbeitung zuständig sind, verknüpft. Beispielsweise ist gemäß der bayerischen Alarmierungsbekanntmachung (ABek) anzustre-

ben, „die Alarmierungsplanung auf Fahrzeuge und kleinere Organisationseinheiten (Schleifen) bezogen anzulegen, um eine möglichst bedarfsgerechte Alarmierung zu erreichen“. In diesem Fall ist also davon auszugehen, dass entsprechend der Alarmierung für jede ausrückende Einheit auch ein neuer Eintrag angelegt wird. Ebenso ist es möglich, dass die eigentlich gültige Alarmordnung durch Sondereinsatzplanungen, wie sie für Flächenlagen nach Starkregenereignissen nicht unüblich sind, außer Kraft gesetzt wird. Im Rahmen dieser gesonderten Einsatzplanung wird u. U. nicht mehr jeder Einsatz einzeln

gezählt, sondern die Lage an sich als ein Einsatz. Die genauen Vorgaben unterscheiden sich dabei jedoch von Kommune zu Kommune.

2. **Verschiedene Akteure und Verfahrenswege beim Anlegen neuer Einsätze:** Das Anlegen neuer Einsätze wird grundsätzlich von der für ein Einsatzgebiet zuständigen Leitstelle vorgenommen und basiert auf den eingehenden Notrufen entsprechend der jeweiligen Alarmierungsplanung. Zusätzlich werden bei Großschadenslagen oftmals aber auch durch die Einsatzorganisationen selbst noch Einsätze aufgenommen, wenn Schadensmeldungen unabhängig vom Notruf direkt bei den Feuerwehren eingehen (etwa weil der Notruf über längere Zeit besetzt ist oder Schäden über die sozialen Medien mitgeteilt werden). Seitens der Leitstellen wird die Eintragung direkt im Einsatzleitsystem vorgenommen. Seitens der Einsatzorganisationen wird für die Dokumentation zunächst auf das Einsatztagebuch zurückgegriffen, die handschriftlich eingetragenen Einsätze werden im Nachhinein an die Leitstelle zur Nachtragung gemeldet. Auf dem Weg über die Feuerwehren kann es entsprechend zu Ungenauigkeiten in der Einsatzzählung kommen, wenn z. B. einzelne Einsätze versehentlich nicht schriftlich erfasst oder die erfassten Einsätze unvollständig an die Leitstelle übermittelt werden.
3. **Verschiedene Auslegungen des Einsatzbegriffs selbst:** Neben dieser verfahrenstechnischen Fehleranfälligkeit spielt beim Anlegen neuer Einsätze aber auch die Auslegung des Einsatzbegriffs selbst eine Rolle. Geht beispielsweise zu einer bereits angelegten Einsatzstelle ein weiterer Notruf ein, kann dieser wahlweise der Einsatzstelle zugeordnet oder ein neuer Eintrag angelegt werden, weil im Feuerwehrwesen gegenüber dem Rettungswesen keine eindeutige Definition eines Einsatzes als „eine Einsatzstelle“ oder „eine Ausrückeinheit“ o. Ä. besteht.
4. **Unterschiedliche Systematik der Eingabesysteme:** Die Eintragung neuer Einsätze wird ebenfalls von den Vorgaben der Eingabesysteme beeinflusst. Die verschiedenen auf dem Markt angebotenen Einsatzleitsysteme scheinen sich in der zugrunde gelegten Datenbankstruktur und der daraus resultierenden Systematik bei der Neuanlage von Einsätzen

zu unterscheiden. Auch die Vorgaben aus den jeweiligen Alarm- und Ausrückordnungen werden in den Systemen abgebildet. Demzufolge kann ein neuer Einsatz möglicherweise oftmals nur über die eine oder andere systemische Begriffsauslegung eingetragen werden.

5. **Unterschiedliche Dokumentationsformen:** Neben der elektronischen Erfassung spielt, wie oben gezeigt, die händische Einsatzdokumentation nach wie vor eine große Rolle. Dort, wo die handschriftlichen Notizen im Anschluss nicht elektronisch überführt werden, steht im Ergebnis vermutlich tendenziell eher *„ein Einsatzbericht mit allen Einsatzkräften und Fahrzeugen und allen Einsatzstellen“*, wie auch einer der Befragungsteilnehmer berichtete.
6. **Unterschiedliche Bedarfsträger:** Nicht zuletzt werden mit den verschiedenen „Zählvarianten“ je nach Bedarfsträger auch unterschiedliche Interessen verfolgt. Neben abrechnungsrelevanten Informationen wird damit beispielsweise auch ein öffentliches Interesse bedient, indem Angaben über die Zahl der Einsätze durch die Medienberichterstattung regelmäßig dazu verwendet werden, Schadensausmaße abzubilden bzw. Aussagen über die Schwere eines Ereignisses zu untermauern.

» Ähnlicher Aufbau der Einsatzdatensätze

Trotz der Unterschiede in den Dokumentationsformen und der Vielzahl verwendeter Programme werden im Wesentlichen sehr ähnliche Einsatzinformationen in den Datensätzen erfasst (vgl. Abbildung 45). Merkmale wie Einsatzart, Einsatzursache und Einsatzdauer werden von fast allen Teilnehmenden genannt. Auch die Zahl der eingesetzten Einsatzkräfte und geleisteten Dienststunden wird von knapp 90 % der Einrichtungen dokumentiert. 93 % verfügen darüber hinaus über ein Freitextfeld, das eine detailliertere Beschreibung des Einsatzes ermöglicht. Weniger Übereinstimmungen gibt es hinsichtlich der Anzahl taktischer Einheiten und insbesondere der Standortgenauigkeit des Einsatzes. Gut ein Fünftel verwendet hierzu GPS-Koordinaten; gebräuchlicher scheinen nach den bisherigen Recherchen Adressangaben oder zumindest die Angabe des Straßennamens.

Enthaltene Informationen in Einsatzdatensätzen

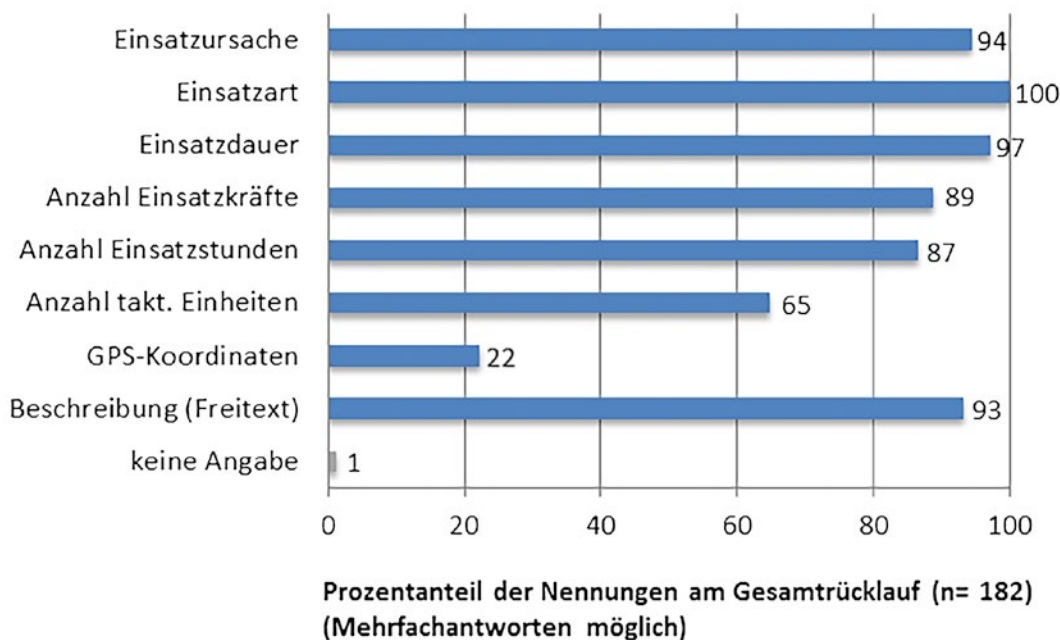


Abb. 45: Enthaltene Informationen in Einsatzdatensätzen.

Welche Einsatzinformationen jeweils von den Einrichtungen erfasst werden, ist dabei teils von Landesvorgaben abhängig. Beispielsweise sind Feuerwehren in Thüringen aufgrund der „Thüringer Verordnung zur Erhebung von Statistiken über den Brandschutz, die Allgemeine Hilfe und den Katastrophenschutz“ (ThürBrandStatVO) vom 15. März 2017 dazu verpflichtet, gewisse Erhebungsmerkmale für die Erstellung der Jahresstatistik an das Land zu übermitteln. Entsprechend werden diese Kennzahlen auch von den Einrichtungen dokumentiert.

» Unterschiedlicher Detailgrad in der Kategorisierung der Einsatzursache

Als eine der erfassten Informationen ist die Einsatzursache für eine Auswertung der Daten im Zusammenhang mit Extremwetterereignissen von besonderer Bedeutung, denn ihre Detailtiefe entscheidet darüber, wie gut ein Einsatz im Nachhinein dem auslösenden Ereignis – in diesem Fall der Ursache „Extremwetter“, genauer: „Starkregen“ – zuzuordnen ist. Drei Viertel der Teilnehmenden halten eine nachträgliche Zuord-

nung von dokumentierten Einsätzen zur einsatzauslösenden Ursache Extremwetter anhand der verwendeten Einsatzstichworte grundsätzlich für möglich (vgl. Tabelle 7).

	absolut	in %
Zuordnung möglich	139	76,4
Zuordnung nicht möglich	38	20,9
keine Angabe	5	2,7
gesamt	5 5	100

Tab. 7: Möglichkeit der Zuordnung von Einsätzen zur Einsatzursache Extremwetter nach Einschätzung der Befragungsteilnehmenden.

Die dafür infrage kommenden Einsatzstichworte werden in Abbildung 46 aufgeführt. Am häufigsten wird das allgemeine Stichwort „Unwetter“ verwendet, gefolgt von den etwas spezifischeren Kategorien „Hochwasser/Überflutung“ und „Sturm/Orkan“. „Starkregen“ wird von knapp 60 Teilnehmenden genannt. Unter „Sonstige“ werden als weitere

Verwendete Stichworte für unwetterbedingte Einsätze

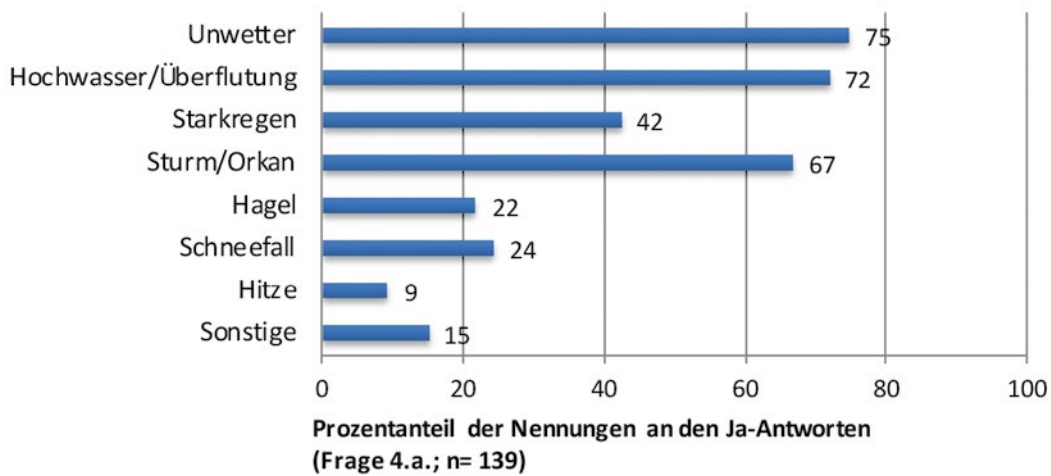


Abb. 46: Verwendete Stichworte für unwetterbedingte Einsätze.

Stichworte zum Beispiel „Flächenlage“, „Muttereinsatz“ oder „Technische Hilfeleistung“ aufgeführt.

Unklar bleibt, inwieweit die für Extremwetter verwendeten Einsatzstichworte jeweils separat verwendet oder ob teilweise auch mehrere Einsatzursachen gesammelt unter ein Stichwort gefasst werden. Nicht unüblich ist beispielsweise die Einordnung von wasser- und sturmbedingten Einsätzen unter einem summarischen Stichwort „Wasser/Sturm“. Ein solches erschwert, ebenso wie allgemein gehaltene Stichworte wie „Unwetter“ oder „Technische Hilfeleistung“, folglich eine Auswertung von Einsätzen eines bestimmten Typus von Extremwettern und lässt überdies zum Teil die Möglichkeit offen, dass auch unwetterunabhängige Einsätze (z. B. aufgrund eines Wasserrohrbruchs) in dieselbe Kategorie einsortiert werden. Auch bei konkretisierenden Schlagworten wie „Wasser im Keller“ ist letztlich nicht auszuschließen, dass es sich hierbei um einen wetterunabhängigen Einsatz handelte.

Die Vergabe solcher Stichworte ist vor dem Hintergrund einiger Anmerkungen jedoch gut nachvollziehbar, nach denen eine Information

über die Ursache für die Bewältigung der Lage nicht unbedingt von hoher Relevanz ist: „Bei uns kommt nur die Wirkung an, nicht das Ereignis.“ „Um Hilfe losschicken zu können“ und die mit dem Stich- oder Schlagwort verknüpften Abläufe und Einsatzmittelketten auszulösen, wird demnach zunächst „nur die Auswirkung einer Unwetterlage (Baum auf Fahrbahn, Keller unter Wasser)“ erfasst. Im Rahmen eines der geführten Experteninterviews wurde darauf hingewiesen, dass viele detaillierte Stichworte auch Schwierigkeiten verursachen könnten, da sie mitunter die Auswahl bei der Einsatzdisposition erschweren: Die vielen Stichworte müsste „der Disponent und die Disponentin [erst mal] alle im Kopf haben“.

Mögliche Lösungsansätze für eine von den Stichworten losgelöste Zuordnung von Einsatzeinträgen wurden von Befragungsteilnehmern formuliert, die angaben, dass eine nachträgliche eindeutige Zuordnung zur Einsatzursache Extremwetter aus ihren Datensätzen nicht möglich sei. So könnte die Hinzuziehung der Beschreibungen aus dem Freitextfeld oder von Erläuterungen zur Einsatzfähigkeit eine Hilfestellung sein. Bei kleineren Datensätzen ist dies sicherlich

machbar. Bei größeren Datensätzen, wie sie auch im Rahmen des Projekts ausgewertet worden sind, war für eine solch kleinteilige Zuordnung allerdings ein erheblicher Zeitaufwand erforderlich.

» **großes Interesse an der Thematik bei den operativen Ebenen**

Das allgemeine Interesse der Befragungsteilnehmenden an dem Projekt und seinen Ergebnissen kann mit 75 % als ausgesprochen hoch bezeichnet werden. Dies wurde an vielen der freiwilligen Äußerungen am Ende des Fragebogens deutlich, wonach die *„Thematik für Feuerwehren eine immer größere Bedeutung [erlangt]“*, verbunden beispielsweise mit der Hoffnung auf eine *„bessere Vorhersage und Alarmierung“* und einem Interesse daran, *„ob sich [die eigene] Beobachtung mit denen anderer Einheiten deckt“*. Von mehreren Teilnehmenden wurden auch Kritik an der praktizierten Einsatzdokumentation und Wünsche nach Veränderung geäußert, z. B., dass *„das Einsatzformular [...] aus Sicht der Nutzer nicht mehr zeitgemäß“* sei oder man sich *„über eine einheitliche und kompatible Einsatzerfassung unter der Leitung der Landkreise freuen“* würde.

Der hohe Gesprächsbedarf und das Interesse seitens der Einrichtungen verdeutlichten umso mehr, dass das Projekt ein Thema aufgreift, das für den Arbeitsalltag der Einrichtungen im operativen Bevölkerungsschutz von unmittelbarer Relevanz ist und wozu offenbar noch nach Unterstützung, mindestens aber ein Austausch zu den Möglichkeiten der Anpassung an die klimatischen Veränderungen gesucht wird. Vor diesem Hintergrund erklärten sich knapp 60 % der Befragten auch zu weiteren Gesprächen und ggf. Einblicken in die lokale Einsatzerfassung bereit.

Zusammenfassung und Bewertung

Aus den Ergebnissen der Onlinebefragung wurde deutlich, dass sich Art und Weisen der Dokumentation, verwendete Eingabesysteme, Einsatzstichworte und Zählweisen von Einsätzen nicht nur zwischen den Ländern, sondern bis hinunter zu den einzelnen Kommunen zum Teil wesentlich voneinander unterscheiden. Der Grund hierfür liegt in der Übertragung der Aufgabendurch-

führung von Brandschutz, allgemeiner Hilfe, Rettungsdienst und Katastrophenschutz auf die kommunale Ebene (vgl. Kapitel 1.3). Zwar regeln Landesgesetze, ergänzt durch Verordnungen und Verwaltungsvorschriften, die Aufgaben, Strukturen und Organisation der nichtpolizeilichen Gefahrenabwehr. Landesweite Vorgaben zur Einsatzdokumentation im Bereich der allgemeinen Hilfeleistung gibt es bislang aber erst ansatzweise, etwa durch die Vorgabe einheitlicher Alarmierungsstichworte und Schlagworte durch die bayerische Alarmierungsbekanntmachung (ABek) oder Festlegung definierter Erhebungsmerkmale und Einführung einer landesweiten Software in Thüringen.

Angesichts der identifizierten Unterschiede und der dadurch bedingten begrenzten Vergleichbarkeit der Einsatzdatensätze ist die kommunal übergreifende Auswertung von Einsatzdaten im Hinblick auf extreme Wetterereignisse mit einigen Schwierigkeiten verbunden. Erforderlich für eine solche Analyse sind Einsatzdaten, die

- in elektronischer, möglichst tabellarischer Form vorliegen,
- einen längeren Zeitraum von mehreren Jahren möglichst ohne Medienbrüche abdecken,
- eine eindeutige Zuordnung zum auslösenden Ereignis ermöglichen oder wenigstens eine relative Annäherung daran erlauben (d. h. mindestens durch ein Stichwort „Wasser“ oder „Unwetter“, genauer: durch ein Stichwort „Starkregen“),
- Einsätze möglichst nach den einzelnen Einsatzstellen aufschlüsseln
- und dafür jeweils eine relativ genaue örtliche Angabe enthalten.

Diese Anforderungen könnten den Ergebnissen der Befragung zufolge von etwa der Hälfte der teilnehmenden Einrichtungen erfüllt werden, wobei einzelne Merkmale – beispielsweise die Standortgenauigkeit – nicht im Detail bekannt sind. Ungewiss ist, inwieweit dieses Ergebnis auf Gemeinden und Städte, die nicht an der Befragung teilgenommen haben, übertragbar ist. Es bleibt jedoch zu vermuten, dass sich die Situation auch über die teilnehmenden Kommunen

hinaus ähnlich (heterogen) darstellt, solange keine landesweiten Regelungen getroffen wurden.

Abschließend sei noch die Frage nach den mit der Einsatzdokumentation verbundenen Zielen und Interessen in den Raum gestellt. Das KlamEx-Projekt spiegelt hierbei in erster Linie ein Interesse aus Bundessicht wider, das darin besteht, über Einsatzdaten langfristig bestehende Belastungen und Bedarfe im Zusammenhang mit extremen Wetterereignissen – oder im größeren Maßstab gesehen: mit dem Klimawandel – sichtbar zu machen, um diese in fundierte Handlungsempfehlungen im Rahmen der nationalen Anpassungsplanung an den Klimawandel überführen zu können. Damit wird gleichermaßen ein Anspruch an die Einsatzdaten formuliert, der sich nur in Teilen mit ihrem ursprünglichen Zweck deckt. So dient das Einsatzberichtswesen zunächst der „Erstellung eines vor Gericht verwertbaren Dokuments“ im Sinne der Rechtssicherheit und der „Schaffung einer soliden Grundlage für die Einsatzabrechnung“ (FISCHER 2015, S. 250). Darüber hinaus ist aber auch die „Bereitstellung von Daten für die statistische Auswertung“ ein erklärtes Ziel: „Die statistischen Daten des Einsatzberichtswesens sind neben der Erstellung eines Jahresberichts auch für die Erarbeitung und Fortschreibung der örtlichen Feuerwehrbedarfsplanung wichtige Grundlage“ (ebd.). Die statistische Auswertbarkeit der Einsatzdaten stellt somit ein gemeinsames Interesse mehrerer administrativer Ebenen dar. Ein erster Schritt zu einer möglichen Weiterentwicklung der Einsatzerfassung könnte darin bestehen, diesen zusätzlichen Nutzen der Einsatzdokumentation nochmals hervorzuheben (vgl. Kapitel 8.1.1.7), denn tatsächlich ist sie weit mehr als „ein Abfallprodukt [...] aus dem Tagesgeschäft, aus dem Einsatzleitsystem“ heraus, wie es einer der Interviewpartner salopp formulierte.

6.2. Verwendung von Feuerwehreinsatzdaten für unwetterbezogene Analysen

Die mit den Niederschlagsdaten zu verschneidenden Einsatzdaten von Feuerwehren konnten über verschiedene Wege gewonnen werden. Zum einen wurden über Kontakte aus der Befragung,

zum anderen durch bereits bestehende Kontakte des BBK zu kommunalen Feuerwehren Informationen zu Einsätzen zur Verfügung gestellt. Des Weiteren konnten Einsatzdaten aus einer frei verfügbaren Datenbank im Internet (FREIWILLIGE FEUERWEHR BAD DOBERAN o. J.) und einer projektbegleitenden Masterarbeit (WISCHOTT 2020) für die Auswertungen verwendet werden. Insgesamt erreichten das BBK somit rund 16.500 Einsatzeinträge aus 12 Kommunen Deutschlands (vgl. Abbildung 47).

Für die Ermittlung eines quantitativen Zusammenhangs zwischen Starkregenereignissen und Einsätzen war eine möglichst vollständige Analyse der Ereignisse und Einsätze für den zur Verfügung stehenden Zeitraum maßgeblich. Nur dann kann eine Aussage darüber getroffen werden, zu welchem Grad Ereignisse auch eine größere Zahl von Einsätzen auslösen bzw. ob – perspektivisch – allein über die Betrachtung von Ereignisgrößen wie Häufigkeit oder Intensität auf das korrespondierende Einsatzgeschehen geschlossen werden kann.

Die Verknüpfung von Ereignis- und Einsatzdaten erforderte zunächst einige grundsätzliche methodische Überlegungen, um eine valide Zuordnung der Informationen aus den unterschiedlich strukturierten Datensätzen zu ermöglichen.

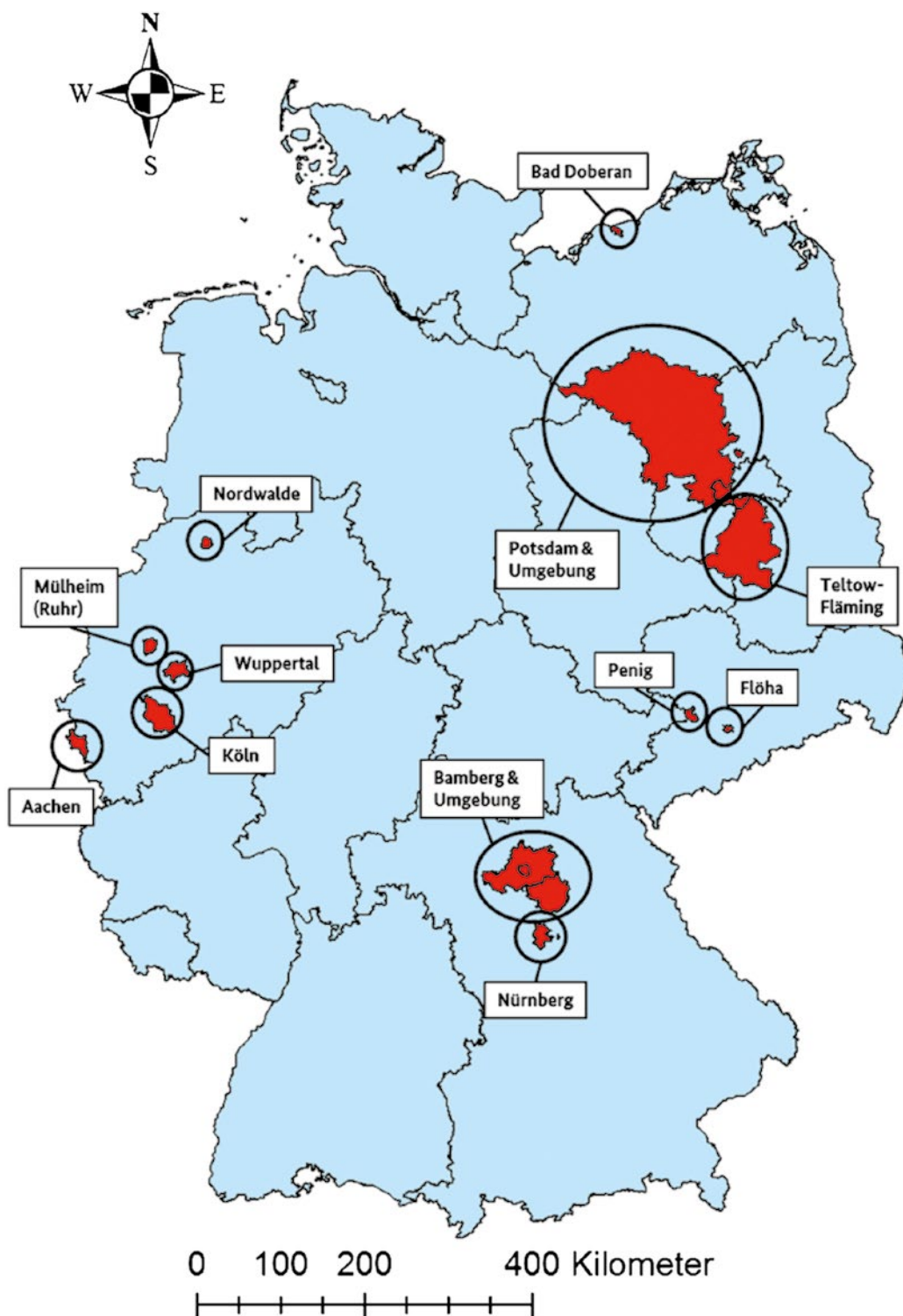


Abb. 47: Einsatzdatengebiete im Projekt KlamEx (Quelle der Karte: GADM 2018).

6.2.1. Entscheidung für einen Ereigniskatalog

Die verschiedenen Definitionsansätze für ein Starkregenereignis bedingten das Vorliegen mehrerer Ereigniskataloge, in denen sich die Anzahl der gelisteten Ereignisse entsprechend den jeweils angelegten Niederschlagsschwellenwerten unterscheidet (vgl. Kapitel 4.3). Deshalb musste zunächst ein Katalog ausgewählt werden, mit dem alle nachfolgenden Analysen durchgeführt werden. Die Auswahl orientierte sich dabei im Wesentlichen an der besten Übereinstimmung mit den vorliegenden Einsatzdaten.

Die beste Passung ergab sich für den Katalog nach W3_Eta und bestätigte damit die bereits getroffene Vorauswahl im Rahmen der meteorologischen Auswertungen (vgl. Kapitel 4.3). Andere Kataloge wie der T5_Eta-Katalog beinhalten zwar insgesamt mehr Ereignisse und erhöhen damit die Wahrscheinlichkeit eines „Treffers“. Die große Zahl der teils sehr kleinteiligen Ereignisse hatte aber auch zur Folge, dass sich zu vielen dieser Ereignisse entweder keine Einsätze oder umgekehrt Einsätze mehreren zeitgleichen Ereignissen bzw. Ereignisabschnitten zuordnen ließen, was die Analyse insgesamt erschwert hätte. Zudem wurde das Argument berücksichtigt, dass die Schwellenwerte für den Katalog nach Warnstufe 3 aufgrund der allgemeinen Bekanntheit der DWD-Warnstufen für die Kommunikation mit den Einsatzorganisationen besser nachzuvollziehen sind.

6.2.2. Plausibilisierung starkregenbedingter Einsätze

Für die weiteren Analysen war es essenziell, Ereignisse mit korrespondierenden Einsätzen von jenen ohne korrespondierende Einsätze unterscheiden zu können. Dazu musste zunächst definiert werden, in welchem Fall Einsätze dem jeweiligen Ereignis zuzurechnen sind. Hierfür wurde ein Plausibilisierungsschema entwickelt, das besonders auf die Einsatzdaten angewendet wurde, bei denen die Einsatzursache „Starkregen“ nicht eindeutig aus den Stich- oder Schlagworten hervorging (vgl. Abbildung 48).

Dazu wurden im ersten Schritt mithilfe von ArcGIS alle Niederschlagszonen aus der Ereignisdatenbank herausgefiltert, die über der Kommune mit verfügbaren Einsatzdaten lagen. Dabei wurde der Ereigniszeitraum auf den Zeitraum der Einsatzdaten eingegrenzt. Anschließend wurde eine Niederschlagszone ausgewählt und mithilfe eines Puffers („Buffer“) von 5 km um die Zone alle Einsätze integriert, die sich in diesem Bereich befinden, um sicherzustellen, dass die Einsätze auch räumlich dem Ereignis zugehörig sind. Durch eine anschließende Filterung der selektierten Einsätze nach Ereignisdatum und Uhrzeit wurde deutlich, ob und wie viele Einsätze an diesem und ggf. auch am darauffolgenden Tag stattgefunden haben. Dabei wurde auf einen sinnvollen Zeitbezug zwischen Ereignisende und Einsatzbeginn geachtet und ein zeitlicher Abstand von maximal



Abb. 48: Plausibilisierungsschema für die Zuordnung von Einsätzen zu Ereignissen.

6 Stunden – bei nächtlich auftretenden Ereignissen von 8 Stunden – zwischen Ereignisende und Einsatzbeginn toleriert. Auf diese Weise wurden beispielsweise für die Niederschlagszone des 20.06.2013 in Köln 16 Einsätze ausgezählt.

Bei der räumlichen Zuordnung trat zum Teil die Schwierigkeit auf, dass Einsätze auch mehreren Ereigniseinträgen zugeordnet werden konnten, da mitunter mehrere Ereigniszonen zur gleichen Zeit und in unmittelbarer räumlicher Nähe vorlagen. Somit trat die Frage auf, ob diese nah beieinanderliegenden Zonen jeweils als separate Ereignisse zu verstehen oder ob sie Teile von ein und demselben Niederschlagsereignis sind. Dies spielt nicht nur für die Zuordnung der Einsätze zu den Ereignissen, sondern auch für die Auszählung der absoluten Ereignisanzahl in einem Gebiet eine Rolle. Hierbei wurde die Regel angewendet, dass alle Ereigniszonen, die weiter als 10 km auseinanderlagen, als eigenständige Ereignisse gezählt wurden, während bei allen Entfernungen darunter die Ereigniszonen zusammenfassend als ein Ereignis gewertet wurden. Einsätze wurden dann den Ereignissen jeweils entsprechend der 5 km-Regel zugeordnet.

Unklar war aufgrund des allgemeinen Stichworts ebenfalls in vielen Fällen, welche bzw. wie viele der räumlich und zeitlich „passenden“ Einsätze wirklich durch das betreffende Starkregenerereignis oder zum Beispiel durch einen ereignisunabhängigen Rohrbruch o. Ä. ausgelöst wurden. Dazu wurde zunächst die Prüfung durch einen Schwellenwert bezüglich der Einsatzanzahl vorgenommen. Nach KUTSCHKER (2018) sind Einsatzcluster zu Beginn eines Starkregenerereignisses charakteristisch, d. h., es treten in der Regel zahlreiche Einsätze innerhalb weniger Stunden auf. Für das Ballungsgebiet Rhein-Main – genauer: die Stadt Offenbach/Main ermittelte er einen erfahrungsbasierten Wert von mindestens 20 Einsätzen pro Stunde. Ein weiterer Schwellenwert von >50 Einsätzen innerhalb von 6 Stunden wurde im Rahmen einer Studie für die Stadt Zürich ermittelt (BABS 2019). Aufgrund der besseren räumlichen und strukturellen Vergleichbarkeit wurde im KlamEx-Projekt auf den Schwellenwert von KUTSCHKER (2018) Bezug genommen und dieser anhand der Einwohnerdichten für die jeweiligen Einsatzdatengebiete umgerechnet, um einen Anhaltspunkt für die „notwendige Menge“ an Einsätzen in den unterschiedlich dicht besiedelten Gebieten zu generieren. Dabei ergab sich

ein Wert von >1 Einsatz/Stunde für Regionen mit >143 Einwohnern/km². Daraus konnte für Köln mit einer Bevölkerungsdichte von 2.686 Einwohnern/km² (Stand 2019, IT NRW 2019) ein Wert von mindestens 19 Einsätzen pro Stunde ermittelt werden, für weniger dicht besiedelte Städte wie Potsdam ein Wert von 7 Einsätzen pro Stunde. In kleineren Gemeinden wurden dagegen auch einzelne zeitlich und räumlich passende, dem Stichwort nach näher auf die Einsatzursache eingegrenzte Einsätze dem Ereignis zugerechnet.

Geführten informellen Gesprächen mit Feuerwehrkräften aus einigen der Einsatzdatengebiete zufolge ist es allerdings in der Praxis schwierig, einen Schwellenwert zu definieren, der für den gesamten lokalen Raum und für jedes Ereignis gültig ist. Zum einen können auch innerhalb einer Siedlung die örtlichen Gegebenheiten variieren, sodass aufgrund diverser Einflussfaktoren wie der Kanalnetzkapazität, lokaler Topografie oder Bebauungsdichte in einigen Ortsteilen eine höhere Gefährdung und eine dementsprechend erhöhte Wahrscheinlichkeit für Einsätze gegeben sein kann als in anderen Teilen. Darüber hinaus können Starkregenzellen lokal auch derart umgrenzt sein, dass nicht immer die gesamte Stadtfläche betroffen sein muss (vgl. Kapitel 6.2.3). Trotz der genannten Einschränkungen erscheint die Verwendung eines Schwellenwertes für eine erste Annäherung prinzipiell sinnvoll. Die Annahme, dass dieser Schwellenwert für ländliche, weniger dicht besiedelte Gebiete niedriger anzusetzen ist, scheint insofern plausibel, als dort nicht nur insgesamt weniger Einsätze zu erwarten sind, sondern aufgrund anderer personeller und materieller Ausstattung die Kapazitätsgrenzen der Feuerwehren auch deutlich schneller erreicht werden dürften.

Dass ein Schwellenwert allein für die Verifizierung der Einsätze jedoch in vielen Fällen nicht ausreichen kann, wird am Beispiel des oben genannten Ereignisses in Köln deutlich. Da das Cluster nur aus 16 statt der definierten 19 Einsätze besteht, würde das Ereignis bei alleiniger Anwendung des Schwellenwertes für die Analyse herausfallen und demzufolge nicht als Ereignis mit korrespondierenden Einsätzen gewertet werden. Allerdings

lässt sich das Einsatzgeschehen zu dem betreffenden Ereignis durch Medienberichte eindeutig bestätigen (vgl. StEB KÖLN 2017). Insbesondere bei Ereignissen mit Einsatzzahlen, die unterhalb des Schwellenwertes liegen, wurde deshalb die Prüfung um einen Schritt erweitert und online nach Medienberichten recherchiert, aus denen Angaben zum Einsatzgeschehen im Zusammenhang mit dem betreffenden Starkregenereignis hervorgehen. Ereignisse wurden erst dann als „Ereignis ohne Einsätze“ gewertet, wenn weder der Schwellenwert an korrespondierenden Einsätzen erreicht noch entsprechende Medienberichte das Einsatzgeschehen für den Tag des Ereignisses belegen konnten (vgl. Abbildung 48). Einschränkend muss hinzugefügt werden, dass diese Wertung nur für das jeweilige Einsatzdatengebiet gilt. Da keine Einsatzdaten aus benachbarten Gemeinden vorlagen, ist nicht auszuschließen, dass dasselbe Ereignis in anderen Kommunen durchaus Einsätze hervorgerufen haben kann.

6.2.3. Umgang mit Ereignissen in Gebietsrandzonen

Eine Unterschreitung der Einsatzschwellenwerte ließ sich in vielen Fällen auch mit der geografischen Lage der Ereigniszone begründen. Die Auswahl der Ereignisse, die innerhalb eines administrativen Bereichs (z. B. Stadtgebiet) stattgefunden haben, bedingt, dass auch solche Ereignisse angezeigt werden, die das Gebiet nur am Rande betreffen, ihren Schwerpunkt (Niederschlagsmaximum) aber u. U. außerhalb des Gebietes hatten. Da die betroffene Fläche bei diesen Randereignissen sehr gering sein kann, kann dieser Grund ausschlaggebend dafür sein, dass es zu dem betreffenden Ereignis auch nur wenige oder keine Einsatzeinträge in dem Datensatz der jeweiligen Kommune gibt bzw. der definierte Schwellenwert für die Mindestzahl an Einsätzen nicht erreicht wird. Um den Einfluss des gesamten Ereignisses auf das Einsatzgeschehen erfassen zu können, bedarf es demnach im Grunde auch der Einsatzdaten umliegender Gemeinden, die in diesem Fall jedoch nicht zur Verfügung standen.

Da es prinzipiell möglich ist, dass auch auf einer nur geringen betroffenen Fläche Einsätze durch

ein Ereignis ausgelöst werden, wurden auch Randereignisse bei nicht vorhandenen Einsätzen als „Ereignisse ohne Einsätze“ markiert und als solche bei der Auszählung der Ereignisanzahl für ein Gebiet berücksichtigt (vgl. Kapitel 7.1). Für die Korrelationsrechnungen zwischen meteorologischen und Geofaktoren und der Anzahl der Einsätze (vgl. Kapitel 7.2) spielte das Problem hingegen keine Rolle, da die Berechnungen sich ausschließlich auf Ereignisse mit eindeutig zugeordneten Einsätzen bezogen.

Insgesamt wird anhand der Ausführungen deutlich, dass die Zuordnung von Einsätzen zu Niederschlagsereignissen bei den vorliegenden Datensätzen nur manuell erfolgen kann und somit mit einem erheblichen Aufwand verbunden ist, da im Grunde eine komplexe Betrachtung aller einzelnen Niederschlagszonen in Verbindung mit zeitlich und räumlich passenden Einsätzen notwendig ist. Näher eingegrenzte Stich- oder Schlagworte und die Orientierung an Einsatzclustern erleichtern jedoch die Zuordnung. Eine genaue Ortsangabe, bestenfalls in Form von GPS-Koordinaten, ermöglicht die Darstellung und Identifizierung lokaler Einsatzschwerpunkte und eine genauere Analyse auch im Hinblick auf mögliche, auf den Zusammenhang zwischen Ereignis und Einsatz einwirkende Einflussfaktoren (vgl. Kapitel 7).

6.3. Verwendung von Einsatzdaten des THW für unwetterbezogene Analysen

Neben Einsatzdaten der Feuerwehr wurden in begrenztem Umfang im Rahmen einer projektbegleitenden Bachelorarbeit (HURSCHMANN 2021) auch Einsatzdaten des THW ausgewertet. Die Einsätze aus dem gesamten Bundesgebiet werden in dem Programm „THWin“, einem universalen Verwaltungstool, dokumentiert. Das Programm ist seit 1996 in Verwendung, mit Änderungen in den Jahren 2005 (Umstellung auf ereignisbezogene Einsatzerfassung) und 2019 (Anpassung der Stammdaten, u. a. auch der Ereigniskategorien). Anleger der Einträge ist in der Regel der jeweils alarmierte Ortsverband, bei größeren Einsätzen unter Umständen auch die übergeordnete Re-

gionalstelle (5 bis 10 Ortsverbände umfassend). Üblicherweise wird für jeden Anfordernden (z. B. Feuerwehr, Polizei) ein neuer Eintrag angelegt, der alle Einsatzstellen des alarmierten Ortsverbandes umfasst. Die enthaltenen Informationen zu einem Einsatz gleichen dabei im Wesentlichen den Basisinformationen, die auch in den meisten Einsatzdatensätzen der Feuerwehren enthalten sind (vgl. Kapitel 6.1). Die Angabe des Einsatzortes basiert allerdings auf einem Freitextfeld und ist erst seit 2018 verpflichtend. Daher sind nur zu schätzungsweise 70 bis 80 % Angaben auf Gemeindeebene verfügbar. Die Angabe der Einsatzursache orientiert sich an einem „Katalog der Einsatzoptionen des THW“, dessen Erarbeitung auf einen Beschluss des Arbeitskreises V der Innenministerkonferenz vom 27.10.2003 zurückgeht und als Orientierungshilfe für eine bundeseinheitliche Kategorisierung unterschiedlicher Gefahrenlagen dient (BUNDEANSTALT THW 2014). Demnach stehen für Einsätze, die durch Starkregen ausgelöst wurden, die Ereigniskategorien „Starkregen, Hagel, Eisregen, Blitzeis“ und „Örtliche Hochwasser durch starke Regenfälle“ zur Verfügung – welche von beiden vorrangig für diesen Ereignistyp genutzt wird, ist offen. Jeder Einsatz in THWin wird durch eine Angabe zur Anzahl der Einsatzkräfte und zu den geleisteten Dienststunden ergänzt.

Für die Auswertungen im Rahmen des Projekts konnten grundsätzlich alle unter den o. g. Stichworten gelisteten Einsätze im Zeitraum 2006 bis 2019 herangezogen werden. Um jedoch die Einsätze einzugrenzen, die durch Starkregen verursacht wurden, und Einsätze aufgrund von Eisregen oder Blitzeis mit hoher Wahrscheinlichkeit auszuschließen, wurde zunächst eine Reduktion des Datensatzes um die Monate November bis April vorgenommen. Eine Trennung der durch Hagel verursachten Einsätze von den durch Starkregen hervorgerufenen Einsätzen war aufgrund der kombinierten Stichworte nicht möglich.

Die Darstellung der Einsatzzahlen nach Jahren zeigt insgesamt deutliche interannuelle Schwankungen und erhöhte Einsatzzahlen in Jahren mit besonders schadensträchtigen Ereignissen (z. B. 2016 in Süddeutschland) (vgl. Abbildung 49). Ergänzend konnte HURSCHMANN (2021) in seiner

explorativen Datenanalyse belegen, dass die meisten starkregenbedingten Einsätze in den Sommermonaten, darunter insbesondere im Monat Juni, stattgefunden haben.

HURSCHMANN (2021) hat darüber hinaus einen Blick auf die Belastung der Einsatzkräfte bei wasserbedingten Einsätzen (Flusshochwasser inbegriffen) geworfen. Aus einem Vergleich der Anzahl eingesetzter Kräfte und geleisteter Dienststunden bei wasserbedingten vs. nicht wasserbedingten Einsätzen konnte für Einsätze nach Starkregen oder Hochwasser ein erhöhter Ressourcenbedarf ermittelt werden. Demnach werden für diese Einsätze „im Schnitt [...] 2,08 mehr Einsatzkräfte benötigt, als bei anderen Ein-

sätzen.“ Auch die geleisteten Dienststunden zeigten sich gegenüber anderen Einsätzen deutlich erhöht (HURSCHMANN 2021, S. 29).

Eine gemeinsame Auswertung der THW-Daten mit den Niederschlagsdaten aus dem Ereigniskatalog konnte im Rahmen des Projekts aus Zeitgründen nicht realisiert werden und wäre demnach ein möglicher Gegenstand weitergehender Analysen. Dabei gälte es grundsätzlich zu beachten, dass Einsätze des THW oftmals zeitverzögert zum Ereignisbeginn – mitunter sogar erst einige Tage später – stattfinden, da häufig erst dann Spezialgerät eingesetzt werden kann oder die Kapazitätsgrenzen der Feuerwehren erreicht sind.

Jährliche Anzahl starkregenbedingter Einsätze des THW 2006-2019

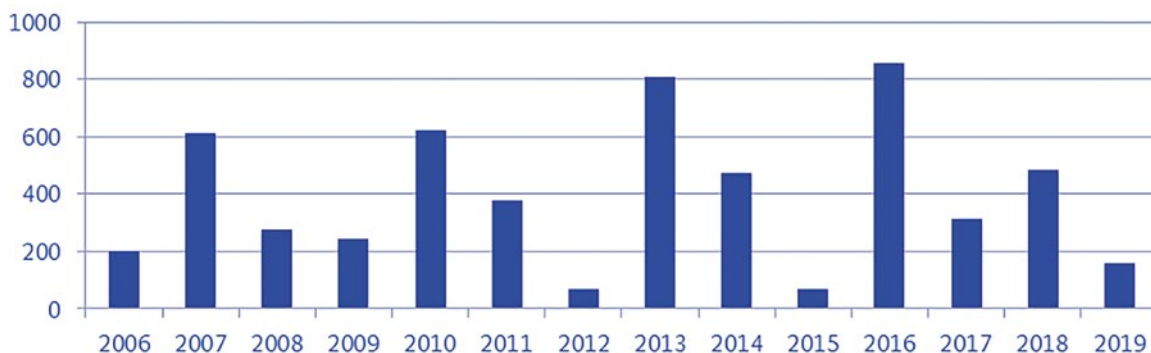


Abb. 49: Anzahl starkregenbedingter Einsätze des THW im Zeitraum von 2006 bis 2019. In das Diagramm fließen alle Einsätze der Kategorien „Starkregen, Hagel, Eisregen, Blitzeis“ und „Örtliche Hochwasser durch starke Regenfälle“ für die Monate April bis Oktober ein.

6.4. Durchführung leitfadengestützter Experteninterviews

Ergänzend zu den Einsatzdaten von Feuerwehr und THW wurden Ergebnisse aus leitfadengestützten Experteninterviews in die Auswertungen integriert. Die Auswahl der Experten orientierte sich dabei an den betrachteten Fallstudien (vgl. Kapitel 7.3) und konzentrierte sich auf die an der Bewältigung des jeweiligen Fallereignisses direkt beteiligten Kräfte der kommunalen Feuerwehren. In den meisten Fällen waren diese in leitender Position in die Ereignisbewältigung eingebunden. Ergänzend wurde im Fall Bam-

berg-Forchheim auch der stellvertretende Leiter der Leitstelle interviewt.

Das Ziel der Interviews lag darin, die grafisch und rechnerisch analysierten Daten der Fallstudien durch eine praxisnahe Perspektive und Erfahrungswissen zu ergänzen. Dazu wurde in Abstimmung mit WISCHOTT (2020) ein Interviewleitfaden entwickelt, der sich grob am Risiko- und Krisenmanagementzyklus orientierte (vgl. Anhang 1). Beginnend mit der Bewältigung wurde zunächst auf das konkrete Ereignis Bezug genommen und es wurden Auswirkungen sowie positive und hinderliche Aspekte bei der Ereignisbewältigung

seitens der Feuerwehr thematisiert. Im Anschluss wurden die Interviewpartner nach den aus ihrer Sicht maßgeblichen Einflussfaktoren auf die Herausbildung von Einsatzschwerpunkten gefragt. Ergänzend zu der allgemeinen Einschätzung galt es, meteorologische und nichtmeteorologische Faktoren auf einer fünfstufigen Skala zu bewerten. Abschließend wurden einige Fragen zu geplanten oder bereits umgesetzten Maßnahmen zur Anpassung an zukünftige Ereignisse gestellt. Nach Bedarf wurden die Fragen des Leitfadens um einige detailliertere Nachfragen ergänzt. Die Interviewdauer betrug zwischen 30 und 45 Minuten.

Die Auswertung der Interviews orientierte sich an thematischen, inhaltlich zusammengehörigen Einheiten und wurde insbesondere in die Beschreibung der Fallbeispiele, aber auch in die Erarbeitung der Handlungsempfehlungen für den Bevölkerungsschutz integriert.

6.5. Durchführung von Dialogveranstaltungen

Um die Praxisnähe der Projekteinhalte und -ergebnisse zu gewährleisten, wurden darüber hinaus im Oktober und November 2020 zwei projektbegleitende Dialogveranstaltungen durchgeführt. Aufgrund der Corona-Pandemie fanden beide Veranstaltungen virtuell statt. Teilnehmende der ersten Veranstaltung waren Vertreterinnen und Vertreter von Kommunen, darunter insbesondere der kommunalen Feuerwehren und aus dem Bereich der Stadtentwässerung, der kommunalen Spitzenverbände sowie Mitarbeiter einer Leitstelle. Die zweite Veranstaltung lud Vertreterinnen und Vertreter aus den Katastrophenschutzreferaten der Landesinnenministerien ein.

In beiden Veranstaltungen wurden ausgewählte Ergebnisse des Projekts vor- und zur Diskussion gestellt. Im ersten Dialog konzentrierte sich der Austausch auf die Bewältigung von Starkregenereignissen sowie Aspekte der Prävention und Vorbereitung aus Sicht der kommunalen Feuerwehren. Der inhaltliche Schwerpunkt des Dialogs mit den Ländern lag demgegenüber auf der Er-

hebung zur Einsatzdokumentation sowie daraus abgeleiteten und im Rahmen der Veranstaltung vorgestellten Vorschlägen zu einer möglichen Weiterentwicklung der Einsatzerfassung.

Die Ergebnisse der Dialogveranstaltungen flossen nicht unmittelbar im Detail in die Projektbearbeitung ein, werden aber aufgrund der dabei übermittelten Erfahrungen und Einschätzungen dennoch als äußerst wertvoll erachtet. Sie können zudem als Grundstein für den weiteren themenbezogenen Austausch mit Verantwortlichen unterschiedlicher Ebenen des Katastrophenschutzes dienen.



7.

Kapitel

Quelle: shutterstock/ChristianThiel

Verknüpfung von Ereignis- und Einsatzdaten

Um qualitative – und im Rahmen der wenigen vorliegenden Einsatzdatensätze eingeschränkt auch quantitative – Aussagen über den Zusammenhang zwischen Starkregenereignissen und Einsätzen treffen zu können, wurden im Rahmen des Projekts verschiedene Analysen durchgeführt. Ihr Ziel war zum einen zu ermitteln, zu welchem Grad Starkregenereignisse auch Einsätze der Feuerwehr zur Folge haben. Dahinter steht die Annahme, dass ein hoher Zusammenhang zwischen Ereignissen und Einsätzen es perspektivisch ermöglicht, allein von der Anzahl der Ereignisse auf die damit zusammenhängende Einsatzbelastung schließen zu können, was insbesondere vor dem Hintergrund einer erwarteten Zunahme in der Häufigkeit von Starkregenereignissen von Bedeutung ist. Zum anderen ging es darum, die wesentlichen, auf den Zusammenhang zwischen Ereignissen und Einsatzgeschehen wirkenden Einflussfaktoren zu bestimmen.

Mit Ausnahme der Fallbeispiele basierten die getätigten Analysen auf den 10 Einsatzdatensätzen, die aufgrund ihrer Datenstruktur und ihres Umfangs eine annähernd quantitative, vergleichende Auswertung erlaubten. Für die Ereignisdaten wurde der Katalog W3_Eta verwendet.

In einer ersten Annäherung an die Frage nach der Enge des Zusammenhangs zwischen Ereignissen und Einsätzen wurden zunächst einige explorative Analysen durchgeführt, deren Ergebnisse in Kapitel 7.1 dargelegt werden. Kapitel 7.2 widmet sich im Anschluss der Untersuchung möglicher Einflussfaktoren auf den Zusammenhang zwischen Ereignissen und Einsätzen, die anhand der Ergebnisse von Korrelationsanalysen beschrieben werden. Kapitel 7.3 beinhaltet abschließend die Beschreibung ausgewählter Fallbeispiele, welche die quantitativen Aussagen durch Beobachtungen aus der Praxis, insbesondere aus dem Einsatzgeschehen heraus, ergänzen und validieren.

7.1. Explorative Zusammenhangsanalysen

In einer ersten Annäherung wurde die Anzahl der nach dem Plausibilisierungsschema (vgl. Kapitel 6.2.2) identifizierten starkregenbedingten

Einsätze aller verwendeten Einsatzdatensätze der Anzahl der Ereignisse, die in den Einsatzdatengebieten auftraten, gegenübergestellt. Dabei wurden auch diejenigen Ereignisse integriert, denen keine Einsatzdaten zugeordnet werden konnten, die also demnach als „Ereignisse ohne Einsätze“ zu werten sind. Ereigniszonen, die weniger als 10 km auseinanderlagen, wurden grundsätzlich zu einem Ereignis zusammengefasst (vgl. Kapitel 6.2.2).

In Abbildung 50 ist die Anzahl der Einsätze der Anzahl der in diesem Gebiet stattgefundenen Starkregenereignisse beispielhaft für einen Zeitraum gegenübergestellt, der von der Mehrzahl der Einsatzdatensätze abgedeckt wurde. Zu sehen ist hierbei, dass das Verhältnis zwischen Ereignissen und Einsätzen über die Jahre betrachtet unterschiedlich ausfällt: Während etwa im Jahr 2018 21 der insgesamt 68 Ereignisse von mehr als 2000 Einsätzen begleitet wurden, löste die annähernd gleich hohe Ereigniszahl im Jahr 2019 nur knapp 500 Einsätze aus. Zu sehen ist auch, dass insgesamt deutlich weniger als die Hälfte der Ereignisse mit Einsätzen einherging. Hierzu sei jedoch einschränkend hinzugefügt, dass einige der Ereignisse die Gebiete nur an den Randzonen getroffen haben, ihren Schwerpunkt jedoch außerhalb des Gebietes hatten (vgl. Kapitel 6.2.3).

Die ungleichmäßige Verteilung zwischen Ereignis- und Einsatzanzahl ist auch Abbildung 51 zu entnehmen, welche die Anzahl beider Größen über die Monate darstellt. Neben einer klaren Konzentration der Ereignisse und Einsätze auf die Sommermonate ist zu erkennen, dass der Monat Mai mit überdurchschnittlich vielen Einsätzen im Vergleich zur relativ geringen Anzahl stattgefundenener Ereignisse heraussticht. Im August hatten demgegenüber gleich viele Ereignisse weitaus weniger Einsätze zur Folge. In den Wintermonaten waren in den betrachteten Kommunen keine Einsätze trotz vereinzelt auftretender Starkregenereignisse zu verzeichnen.

Vergleich der Anzahlen von Starkniederschlagsereignissen und korrespondierenden Feuerwehreinsätzen für ausgewählte Kommunen/Regionen Deutschlands 2013-2019

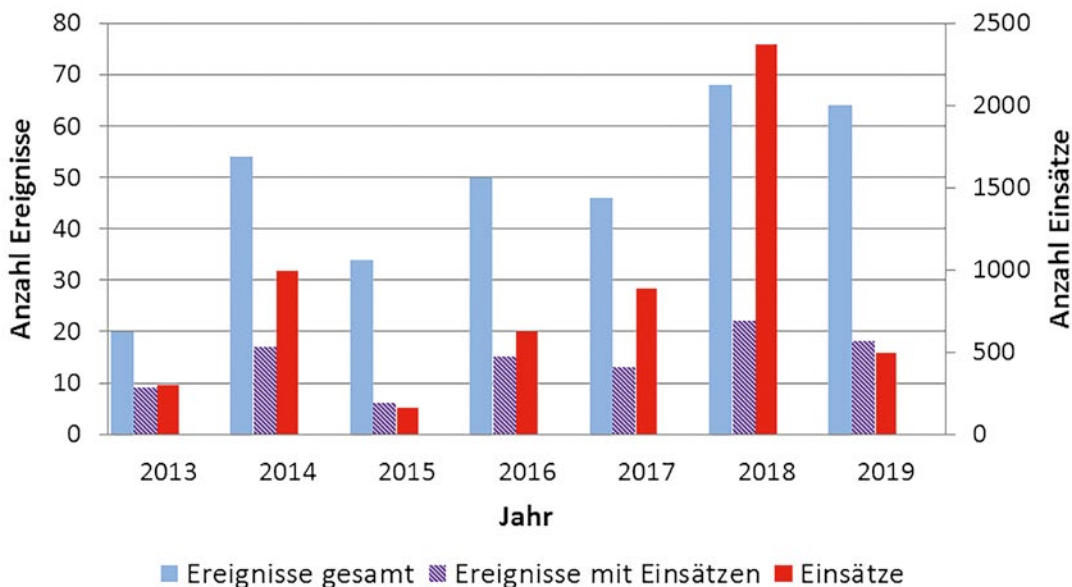


Abb. 50: Anzahl der Starkniederschlagsereignisse und korrespondierenden Feuerwehreinsätze 2013-2019 für ausgewählte Kommunen Deutschlands. Die schraffierten Balken geben die Anzahl der Ereignisse aus der Gesamtzahl der das Gebiet schneidenden Ereignisse wieder, denen die Einsätze zugeordnet werden konnten. Es wurden die Ereignisse aus Katalog W3_Eta für den Zeitraum 2013 bis 2019 zugrunde gelegt.

Verteilung von Ereignis- und Einsatzanzahlen nach Monaten für ausgewählte Kommunen Deutschlands 2013-2019

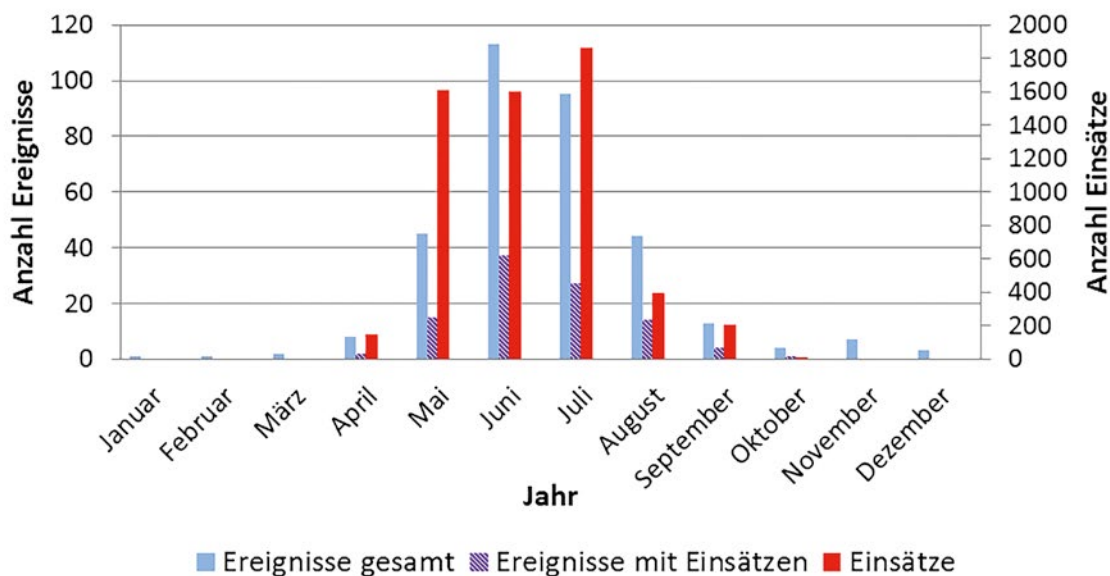


Abb. 51: Verteilung der Ereignisse und Einsätze auf die Monate für die Jahre 2013-2019. Die schraffierten Balken geben die Anzahl der Ereignisse aus der Gesamtzahl der das Gebiet schneidenden Ereignisse wieder, denen die Einsätze zugeordnet werden konnten. Es wurden die Ereignisse aus Katalog W3_Eta für den Zeitraum 2013 bis 2019 zugrunde gelegt.

Um das Verhältnis zwischen Ereignissen und Einsätzen noch genauer zu bestimmen, wurde für jedes Einsatzdatengebiet die Anzahl der Ereignisse mit daraus hervorgehenden Einsätzen der Anzahl der Ereignisse gegenübergestellt, denen keine Einsätze zugeordnet werden konnten. Die Anzahl der Einsätze wurde bei den „Ereignissen mit Einsatz“ nicht berücksichtigt. Aus den „Ereignissen mit Einsatz“ und „Ereignissen ohne Einsatz“ wurde ein prozentuales Verhältnis gebildet, das Tabelle 8 zu entnehmen ist. Demnach hat im Durchschnitt jedes dritte Starkregenereignis Feuerwehreinsätze in den betreffenden Gebieten ausgelöst, wobei die Zahl zum Teil auch deutlich höher oder geringer ausfällt. Dieses einfache errechnete Verhältnis lässt sich dahin gehend interpretieren, dass nicht jedes über einem Siedlungsgebiet niedergehende Starkregenereignis per se Einsätze in diesem Gebiet auslöst. Einschränkend sei hinzugefügt, dass dies nicht bedeutet, dass aus dem Ereignis anderorts nicht doch Einsätze hervorgegangen sein können; da für die umliegenden Gebiete jeweils keine Einsatzdaten vorlagen, ist darüber jedoch keine Aussage zu treffen. Angesichts der Tatsache, dass die Mehrzahl der Einsatzdatengebiete größere Räume abdeckt und Starkregenereignisse

häufig sehr lokal ausfallen, kann oben beschriebenes Ergebnis dennoch als Anhaltspunkt für weitere Analysen dienen. Es wirft im Besonderen die Frage auf, welche Faktoren auf den Zusammenhang zwischen Ereignis und Einsatz einwirken und dazu beitragen, dass aus Ereignissen mal mehr, mal weniger und mal gar keine Einsätze hervorgehen (siehe Kapitel 7.2 und 7.3).

Weitere Einschränkungen liegen in der Struktur der Einsatzdatensätze begründet. Wie in Kapitel 6.1 dargelegt, sind die Datensätze nur bis zu einem gewissen Grad miteinander vergleichbar. Bei Datensätzen mit allgemeineren Stichworten wie „Wasser“ ist zum Beispiel nicht auszuschließen, dass vereinzelt Einsätze fälschlicherweise einem Ereignis zugeordnet oder – im Gegenteil – nicht berücksichtigt wurden. Auch die zum Teil unterschiedliche Auslegung des Einsatzbegriffes in den Datensätzen erschwert die Vergleichbarkeit. Darüber hinaus fallen die Zeiträume, für welche die Einsatzdaten vorliegen, unterschiedlich aus, da zum Teil nicht für den gesamten Zeitraum der Niederschlagsdaten digitalisierte und somit statistisch auswertbare Daten zur Verfügung standen. ENGEL (2020) weist in diesem

Stadt	Ereignisse ohne Einsätze	Ereignisse mit Einsätzen	Anteil der Ereignisse mit Einsätzen in %
Bad Doberan	16	9	56,25
Nürnberg	20	10	50,00
Köln	23	10	43,48
Mülheim	12	5	41,67
Bamberg	64	23	35,94
Penig	27	9	33,33
Wuppertal	39	13	33,33
Teltow-Fläming	59	14	23,73
Aachen	34	8	23,53
Potsdam	96	20	20,83
Summe	390	121	31,03

Tab. 8: Zusammenhangsanalyse von Ereignis und Einsatz. Die Tabelle basiert auf der Auszählung von Ereignissen mit vs. ohne korrespondierende Einsätze für die jeweiligen Einsatzdatengebiete. Daraus wurde in der rechten Spalte ein prozentuales Verhältnis gebildet.

Zusammenhang darauf hin, dass insbesondere die Feststellung möglicher Trends in den Einsatzhäufigkeiten grundsätzlich großen Unsicherheiten unterworfen ist, da ansteigende Verläufe oft schlicht mit einer steigenden Nutzung des Internets und elektronischer Dokumentationssysteme erklärt werden können. Aus diesem Grund wurde die Anzahl der starkregenbedingten Einsätze aus den Datensätzen hierbei auch nicht für alle verfügbaren Jahre abgebildet, sondern die Darstellung lediglich auf wenige Jahre beschränkt.

Aufgrund der genannten Unwägbarkeiten und der Beschränkung aller Analysen auf das vorliegende Sample aus 12 Einsatzdatensätzen sollten die getroffenen Aussagen daher zunächst auch nur für diese Gebiete geltend erachtet werden.

Auch vonseiten der Ereignisdaten liegen einige Einschränkungen vor. Vereinzelt ließ sich in den Einsatzdaten eine starke Häufung von Einsätzen erkennen, der aber kein Ereignis zugeordnet werden konnte. In diesen Fällen wurde ein manuelles Korrekturverfahren angewendet und durch eine Herabsetzung der angesetzten Niederschlagschwellen geprüft, ob ein Starkregenereignis vorlag. Hierüber konnte in den meisten Fällen ein entsprechendes Ereignis zugeordnet werden. Nichtübereinstimmungen dieser Art sind allerdings auch insofern nicht verwunderlich, als sich die Kategorisierung von Einsätzen nach „Starkregen“ – sofern diese Kategorie zur Auswahl steht – an der subjektiven Einschätzung des Disponenten orientiert und nicht an den Warnschwellen des DWD. Es ist also theoretisch möglich, dass ein Niederschlagsereignis als Starkregen empfunden wird, das gemäß der meteorologischen Definition kein solches ist. Insofern ist zu berücksichtigen, dass die objektive Klassifizierung mit der subjektiven Einschätzung aufseiten der Gefahrenabwehrbehörden kollidieren kann.

Hinzu kommt die durch die Ereignisdefinition bedingte „künstliche“ Begrenzung der Ereigniszonen, die in der Realität einen größeren Radius betreffen können. Durch die Einbeziehung von Einsätzen in einem Umkreis von 5 km um die Ereigniszonen wurde dieses Problem jedoch weitestgehend umgangen.

Trotz der genannten Einschränkungen ist die erstmals auch durch Daten abgebildete Erkenntnis, dass manche Starkregenereignisse sehr viele Einsätze zur Folge haben, während andere Ereignisse kaum oder keine Einsätze auslösen, auch aufgrund der Erfahrungen aus der Praxis als plausibel zu erachten. Dies wirft die Frage auf, welche Faktoren den Zusammenhang zwischen Ereignis und Einsatz moderieren.

7.2. Zusammenhangsanalysen zur Ermittlung von Einflussfaktoren

Um den Einfluss meteorologischer und nicht-meteorologischer Größen auf die Herausbildung von Einsatzstellen zu ermitteln, wurden Zusammenhangsanalysen zwischen den Attributen des Ereigniskatalogs und den für ausgewählte Regionen verfügbaren Einsatzdatensätzen durchgeführt. Die in diesem Kapitel beschriebene Analyse umfasst die gesamten Zeiträume der bereitgestellten Einsatzdaten („klimatologischer“ Ansatz), während im nachfolgenden Kapitel einzelne Fallstudien betrachtet werden („Wetter“-Ansatz).

Datenvorbereitung

In einem vorbereitenden Schritt wurden die Einsatzdaten mit den Ereignisdaten abgeglichen und um solche bereinigt, die wahrscheinlich nicht ursächlich mit den Starkregenereignissen verbunden waren (vgl. Kapitel 6.2). Die Analyse erfolgte anschließend für alle Städte und Gemeinden, in denen mindestens ein Einsatz verzeichnet war, wobei Flächen des RADKLIM-Gitters, die zu mehr als 50 % innerhalb der betrachteten Stadt bzw. Gemeinde liegen, berücksichtigt wurden. In einem ersten Schritt erfolgte eine Verknüpfung der Daten und Katalogattribute mit dem zugrunde gelegten RADKLIM-Gitter.

Alle Einsatzdaten wurden auf eine Anzahl von Einsätzen pro RADKLIM-Pixel aggregiert; lag in einer Gitterbox kein Einsatz vor, wurde entsprechend der Wert „Null“ zugewiesen. Den folgenden Berechnungen liegen unterschiedliche Besetzungen von Einsatzklassen zugrunde. Aus Abbildung 52 geht hervor, dass insgesamt deutlich mehr Pixel mit weniger als 5 Einsätzen/km²

vorlagen, während mehr als 10 Einsätze/km² eher selten auftraten. Darüber hinaus variieren die Einsatzanzahlen deutlich zwischen den betrachteten Einsatzdatenregionen.

Die im Original in höherer Auflösung vorliegenden geografischen Attribute wurden ebenfalls auf jeweils ein RADKLIM-Pixel umgerechnet. Zur Berechnung der Geländehöhe sowie des TPI wurde dabei der Median über alle enthaltenen Werte ermittelt. Alle Geodatensätze sind in Tabelle 1 beschrieben (vgl. Kapitel 3.3).

Die verwendeten Niederschlagsparameter gelten für den jeweilig verfügbaren Einsatzdatenzeitraum und umfassen sowohl pixelbasierte Ereignisinformationen als auch Niederschlagsdaten aus RADKLIM.

Korrelationsanalysen

Von den folgenden Betrachtungen wurden 3 der 12 Einsatzdatensätze ausgenommen, da sie insgesamt zu wenige oder räumlich zu grob aufgelöste Einträge enthielten.

In einer ersten vorbereitenden Analyse wurden potenzielle Zusammenhänge zwischen geografi-

schen Parametern und Einsatzhäufigkeiten untersucht und die Notwendigkeit zur Korrelationsanalyse geprüft. Das Ergebnis dieser Analyse ist Abbildung 53 zu entnehmen. Sie zeigt den Zusammenhang der Urbanisierungsparameter sowie des TPI und der klassifizierten Anzahl der Einsätze über alle betrachteten Städte und Gemeinden. Man erkennt eine deutliche Zunahme der Zahl der Einsätze mit steigender Einwohnerzahl, höherem Versiegelungsgrad und Siedlungsgrad sowie niedrigerem TPI (d. h. stärkerer Ausprägung von Senken).

Eine Zusammenschau der Abhängigkeit der Einsatzzahlen von den Geoparametern zeigt auch Abbildung 54 am Beispiel der Stadt Wuppertal. Auf der Abszisse ist der Versiegelungsgrad, auf der Ordinate der TPI aufgetragen. Die Größe der Kreise symbolisiert die Einsatzanzahl. Die Abbildung zeigt, dass Einsätze zwar auch bei geringen Versiegelungsgraden und positivem TPI auftreten, hohe Einsatzzahlen jedoch insbesondere bei hohen Versiegelungsgraden und negativem TPI zu finden sind. Eine Abhängigkeit von der Anzahl der Stunden mit einem Niederschlagswert oberhalb der Warnschwelle Stufe 3 – ausgedrückt durch die Farbtiefe des Blautons – ist nicht zu erkennen.

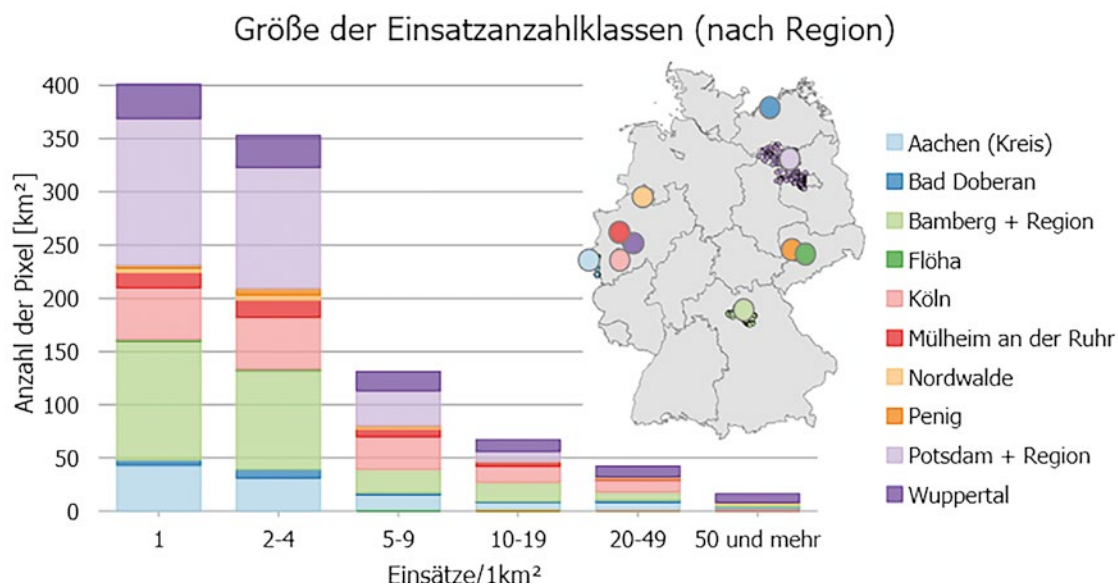


Abb. 52: Anzahl der Pixel der gewählten Einsatzdatenklassen; die farblichen Markierungen stehen für 10 Regionen, für die im Rahmen von KlamEx Einsatzdaten zur Verfügung gestellt wurden.

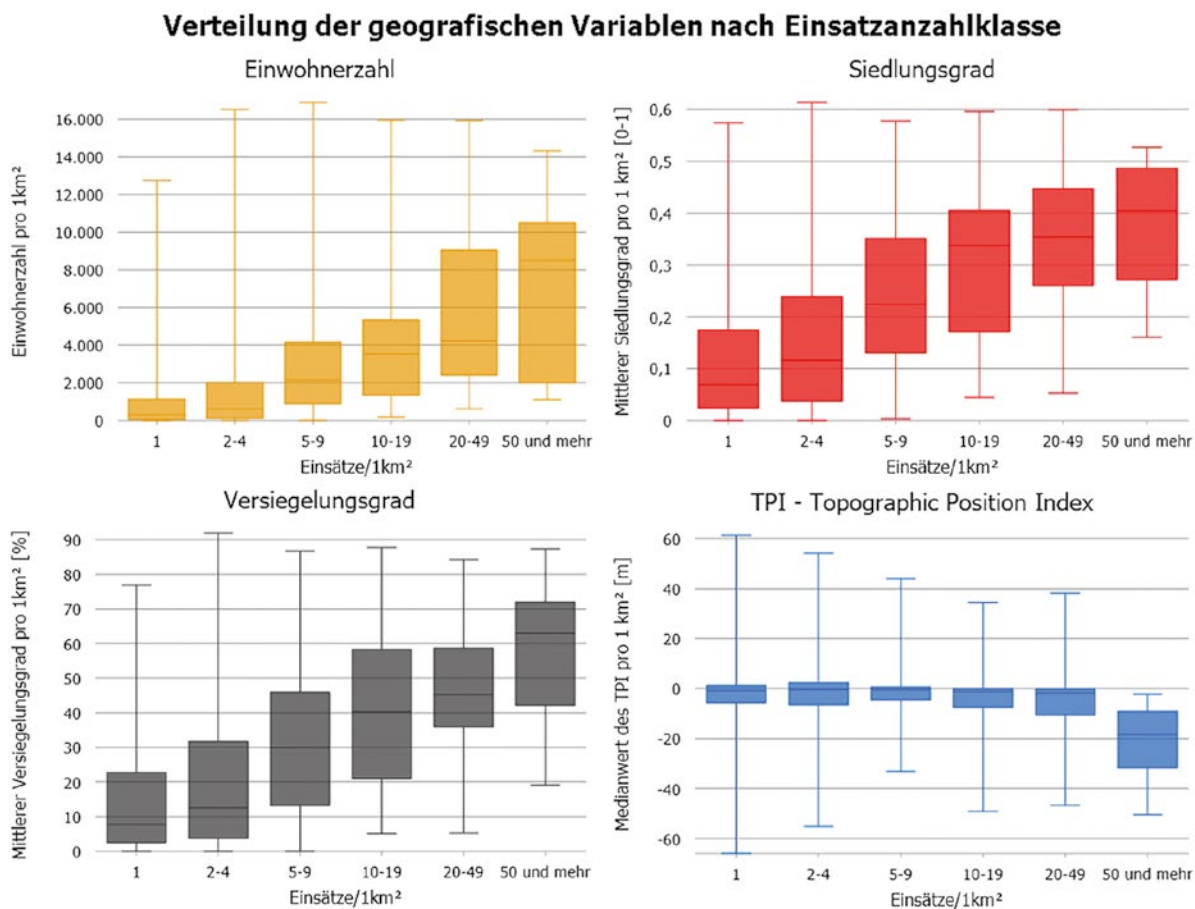


Abb. 53: Zusammenhang zwischen ausgewählten Geoparametern und Einsatzanzahlen über alle zur Verfügung gestellten Einsatzdatensätze.

In einer vertiefenden Analyse wurden die regionalen Korrelationen zwischen der Einsatzanzahl pro Pixel und den zugehörigen meteorologischen sowie Geoparametern über die gesamte jeweils verfügbare Zeitspanne der Einsatzdokumentation separat für die ausgewählten Städte und Gemeinden untersucht. Dabei wurden sowohl Ereignisparameter der Kataloge als auch Niederschlagsdaten aus RADKLIM in die Analyse einbezogen. Zusätzlich zum Pearson-Korrelationskoeffizienten wurde die Signifikanz bestimmt. Als Maß für die Urbanisierung wurden die Einwohnerzahl, der Versiegelungsgrad sowie der Siedlungsgrad herangezogen. Die untersuchten topografischen Attribute umfassten die Geländehöhe und den Topographic Position Index (TPI, vgl. Kapitel 3.3), für die jeweils der Median der hochaufgelösten Daten über das betrachtete RADKLIM-Pixel als repräsentativ angesehen wurde. Die Ergebnisse in Tabelle 9 zeigen für alle Gebiete eine hohe signifikante Korrelation

mit den Siedlungsparametern. Die Korrelation mit der Topografie ist in allen Fällen negativ (mehr Einsätze in Senken) oder liegt nahe Null. Der Einfluss der Topografie ist dabei insbesondere in Gebieten mit einer ausgeprägten Geländestruktur (z. B. Wuppertal) zu erkennen. Obwohl das extreme Niederschlagsereignis an sich natürlich ein notwendiges Kriterium für starkregenbedingte Einsätze darstellt, fällt die Korrelation mit den meteorologischen Parametern sehr heterogen aus. Hierüber wird deutlich, dass der Impact eines Extremereignisses nicht notwendigerweise im Bereich der höchsten Niederschlagssummen und intensitäten am größten ist, sondern durch den horizontalen Transport des Wassers räumlich versetzt auftreten kann.

Erstellung von Gefährdungskarten

Um außerdem eine erste Abschätzung gefährdeter Regionen innerhalb der betrachteten Städte

durchzuführen, wurde ein Schwellenwert für ein binäres Gefährdungspotenzial bestimmt. Hierzu wurden die Mediane der in Abbildung 53 dargestellten Klasse mit 5 bis 9 Einsätzen pro RADKLIM-Pixel für den Versiegelungsgrad (VGL), den Siedlungsgrad (SDL) und den TPI angesetzt. Die Kombination erfolgt über eine logische Additivverknüpfung:

$$\text{VGL} \geq 30 \% \wedge \text{SDL} \geq 24 \% \wedge \text{TPI} < 0,5 \text{ m}$$

Abbildung 55 zeigt am Beispiel der Stadt Aachen die auf diese Weise geschätzten potenziellen Gefahrenzonen in roter Markierung. Um die starke Abhängigkeit vom Versiegelungsgrad widerzuspiegeln, wurden darüber hinaus die Regionen mit einem Versiegelungsgrad von mindestens 50 % gekennzeichnet (orange). Zusätzlich dargestellt sind die Orte der Feuerwehreinsätze. Der Vergleich zeigt, dass bereits mit einer relativ einfachen Abschätzung des Gefährdungspotenzials auf Basis der Zusammenhangsanalysen eine gute räumliche Übereinstimmung mit den Ein-

sätzen erreicht werden kann. Darüber hinaus ist zu erkennen, dass die Häufung der Einsatzzahlen nicht notwendigerweise an den Orten der häufigsten extremen Niederschläge (Schwellenwertüberschreitung der Warnstufe 3) auftritt. Diese Ergebnisse gelten für alle betrachteten Einsatzdatenregionen. Die entsprechenden Abbildungen für die übrigen Städte und Gemeinden sind im Anhang zu finden. Weiterführende Arbeiten mit dem Ziel der Erstellung von Starkregenrisikokarten werden aktuell im Rahmen des Projekts IVS Sturzfluten am DWD durchgeführt.

Die Analysen zeigen insgesamt, dass stark versiegelte Senken mit hohem Siedlungsgrad und großer Einwohnerzahl prädestinierte Hotspots darstellen, an denen potenziell vermehrt Schäden durch Starkregen zu erwarten sind.

Im Rahmen von KlamEx erfolgten darüber hinaus detailliertere Analysen für ausgewählte Ereignisse im Rahmen der im Folgenden beschriebenen Fallstudien.

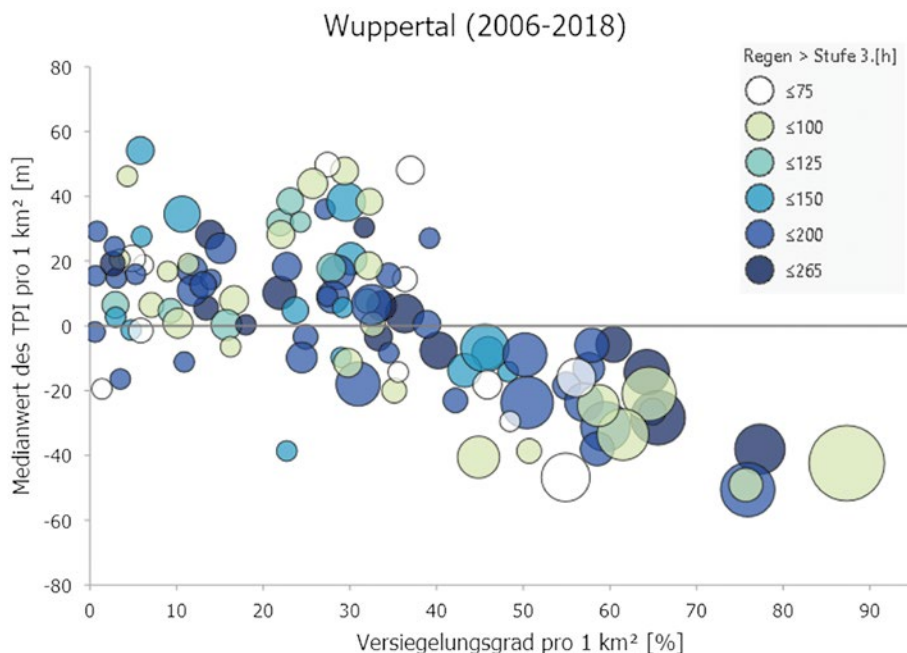


Abb. 54: Zusammenhang zwischen der Einsatzzahl (Größe der Kreise), der Stundenanzahl > Warnstufe 3 (Farbe), dem Versiegelungsgrad (x-Achse) und dem TPI (y-Achse).

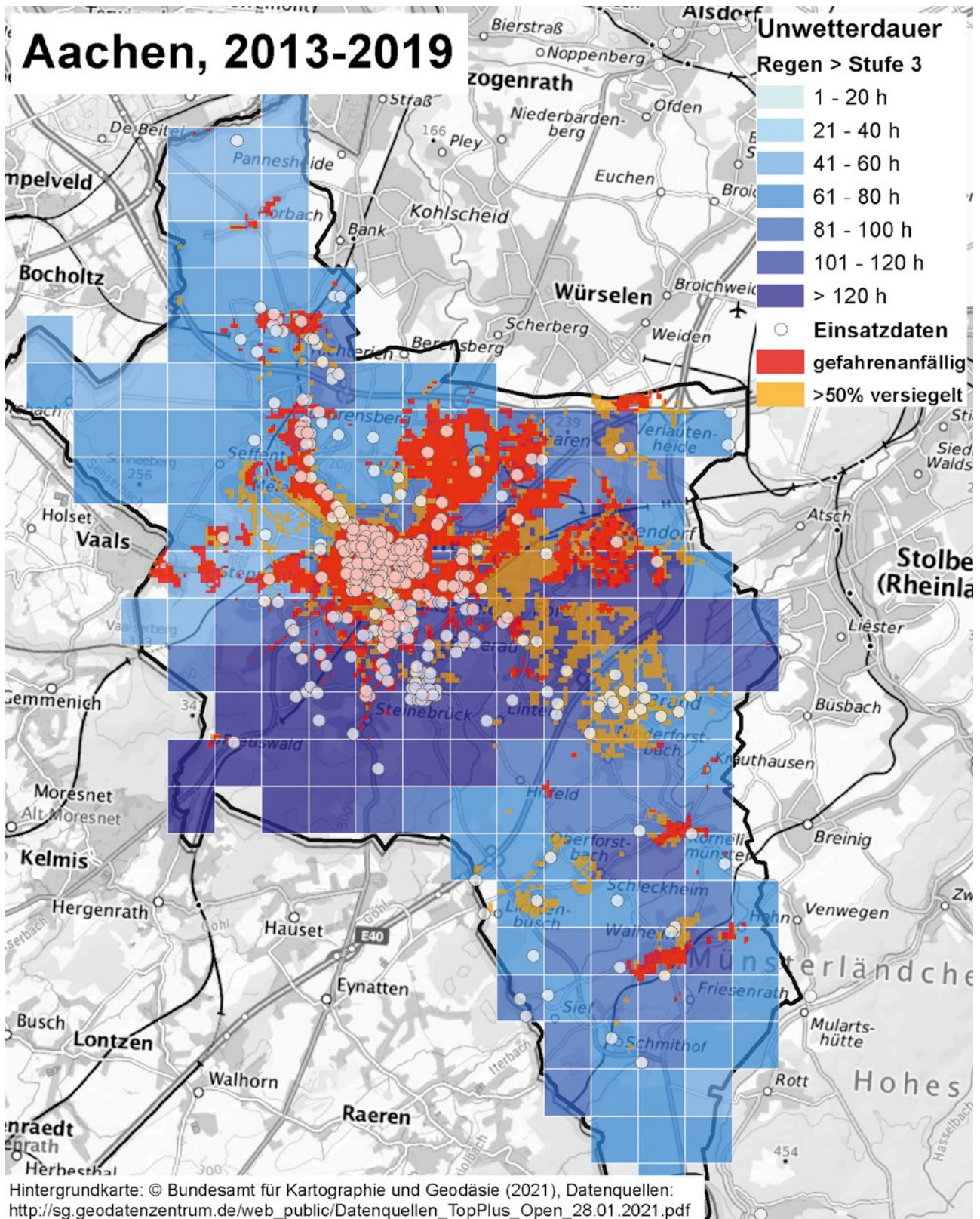


Abb. 55: Erste Abschätzung einer Starkniederschlagsgefahrenkarte für die Stadt Aachen auf der Basis kombinierter Katalogattribute mit hoher Korrelation zu den verfügbaren Einsatzdaten.

Region:	Aachen Stadt	Bad Doberan	Bamberg und	Köln	Mülheim an der	Nordwalde	Penig	Potsdam Stadt	Wuppertal
Zeitraum:	2013 – 2019	2002 – 2019	2014 – 2019	2013 – 2018	2013 – 2019	2010 – 2014	2001 – 2018	2015 – 2019	2006 – 2018
Jahre:	7	18	6	6	7	5	18	5	13
Einsatztage:	10	11	24	13	6	5	11	11	16
Einsatzanzahl:	639	216	1125	891	196	303	24	225	1280
Einsatzgrids:	77	19	255	155	42	16	10	62	109
RADKLIM Grids (=KRS/GMD Fläche):	178	196	1629	446	99	55	71	200	186
Einsätze/1km2 des Einsatzgrids	8,3	11,4	4,4	5,7	4,7	18,9	2,4	3,6	11,7
Einsätze/1km2 des Regions	3,6	1,1	0,7	2,0	2,0	5,5	0,3	1,1	6,9
Betroffene Fläche [%]	43,3 %	9,7 %	15,7 %	34,8 %	42,4 %	29,1 %	14,1 %	31,0 %	58,6 %

Korrelation Signifikanz: * p<0.05 (95 %), ** p < 0.01 (99 %), *** p < 0.001 (99,9 %), - nicht signifikant

Tab. 9: Korrelationen zwischen der Einsatzanzahl und den Meteo- sowie Geovariablen; die Farben markieren positive (rot) und negative (blau) Korrelationen; die Sterne zeigen die Signifikanz an.

Region:	Aachen Stadt		Bad Doberan		Bamberg und		Köln		Mülheim an der		Nordwalde		Penig		Potsdam Stadt		Wuppertal			
	Korr.	Sig.	Korr.	Sig.	Korr.	Sig.	Korr.	Sig.	Korr.	Sig.	Korr.	Sig.	Korr.	Sig.	Korr.	Sig.	Korr.	Sig.		
Variablen:																				
Ereignisanzahl > Warnstufe 3 (W3Eta)	0,09	-	0,16	*	-0,03	-	0,27	***	0,16	-	-0,15	-	0,13	-	0,18	*	0,2	**		
Ereignisanzahl mit SRI _{max} ≥ 8 (W3Eta)	0,28	***	0,12	-	0,01	-	0,08	-	0,04	-	-0,12	-	0,02	-	0,25	***	0,22	**		
Ereignisanzahl mit SRI _{max} ≥ 5 (W3Eta)	0,28	***	0,07	-	0	-	0,33	***	0,18	-	-0,12	-	0,03	-	0,24	***	0,41	***		
Ereignisanzahl T ≥ 5 a (T5Eta)	0,22	**	0,1	-	-0,04	-	0,08	-	0,06	-	-0,13	-	0,02	-	0,27	***	0,29	***		
Stundenanzahl > Stufe 2 Starkregen	0,04	-	0,2	**	0,03	-	0,19	***	0,26	**	-0,13	-	-0,19	-	0,34	***	0,2	**		
Stundenanzahl > Stufe 3 Starkregen	0,13	-	0,16	*	0,03	-	0,26	***	0,01	-	-0,06	-	0,04	-	0,22	**	0,23	**		
Stundenanzahl > Stufe 4 Starkregen	0,07	-	-0,01	-	0,01	-	0,26	***	-0,04	-	-0,24	-	-0,15	-	0,1	-	0,13	-		
Stundenanzahl > Stufe 2 Dauerregen	-0,03	-	0,21	**	0	-	0,13	***	0,2	*	-0,07	-	-0,14	-	0,19	**	0,07	-		
Stundenanzahl > Stufe 3 Dauerregen	0,1	-	0,14	-	-0,03	-	0,29	***	0,06	-	0,03	-	-0,14	-	0,23	***	0,05	-		
Stundenanzahl > Stufe 4 Dauerregen	0,06	-	-0,02	-	-0,02	-	0,41	***			-0,08	-	-0,06	-	-0,03	-	-0,05	-		
URBANISIERUNG:																				
Einwohnerzahl	0,76	***	0,6	***	0,35	***	0,58	***	0,62	***	0,76	***	0,75	***	0,63	***	0,67	***		
Verseelungsgrad	0,65	***	0,59	***	0,4	***	0,42	***	0,45	***	0,65	***	0,72	***	0,6	***	0,63	***		
Siedlungsgrad	0,67	***	0,55	***	0,41	***	0,49	***	0,49	***	0,67	***	0,71	***	0,63	***	0,57	***		
TOPOGRAFIE:																				
Geländehöhe (Median)	-0,2	**	-0,08	-	-0,16	***	0,03	-	-0,09	-	-0,02	-	-0,41	***	0,04	-	-0,3	***		
TPI 2 km (Median)	-0,15	*	-0,14	*	-0,08	**	-0,01	-	-0,09	-	-0,38	***	-0,53	***	-0,05	-	-0,33	***		

Korrelation Signifikanz: * p<0.05 (95 %), ** p < 0.01 (99 %), *** p < 0.001 (99,9 %), - nicht signifikant

Fortsetzung Tab. 9: Korrelationen zwischen der Einsatzanzahl und den Mete- sowie Geovariablen; die Farben markieren positive (rot) und negative (blau) Korrelationen; die Sterne zeigen die Signifikanz an.

7.3. Fallstudien

Während die in Kapitel 7.2 präsentierte übergreifende Korrelationsstudie allgemeine Zusammenhänge aufdecken sollte, dienen die im Folgenden präsentierten Fallstudien dazu, diese Zusammenhänge anhand einzelner Starkregenereignisse zu prüfen und den potenziellen Einfluss einzelner Ereignisattribute zu analysieren. Ergänzend sollten aus den durchgeführten Experteninterviews auch Informationen über nichtquantitative Einflussfaktoren gewonnen werden (vgl. Kapitel 6.4).

Die Auswahl der Fallstudiengebiete orientierte sich zum einen an den vorliegenden Einsatzdatensätzen und zum anderen an markanten Niederschlagsereignissen, die innerhalb dieser Gebiete stattgefunden haben und deshalb für eine nähere Betrachtung geeignet schienen. Soweit es im Rahmen der zur Verfügung stehenden Einsatzdaten möglich war, wurde auf eine ausgeglichene Verteilung der Gebiete innerhalb des Bundesgebietes und die Abbildung unterschiedlicher geografischer und siedlungsrelevanter Gegebenheiten geachtet, um beispielsweise eine Gegenüberstellung städtischer Bereiche mit ländlicher geprägten Räumen zu ermöglichen. Im Vordergrund der Betrachtung stand jeweils die Beschreibung der lokalen Auswirkungen des ausgewählten Ereignisses sowie des Umgangs mit seinen Folgen aus der Perspektive der Feuerwehr. Hierzu wurden die Informationen aus den geführten Experteninterviews integriert (vgl. Kapitel 6.4). Ein besonderes Augenmerk lag darüber hinaus auf der Untersuchung der maßgeblichen Einflussfaktoren auf die Bildung von Einsatzstellen. Dazu wurden ergänzend zu der allgemeinen Korrelationsrechnung (vgl. Kapitel 7.2) für jedes ausgewählte Ereignis zusätzlich pixelbasierte Korrelationen zwischen der Anzahl der Einsätze und den geografischen und meteorologischen Parametern für die jeweiligen Zeitpunkte der Ereignisse durchgeführt. Im Rahmen der Fallstudien wurden alle Pixel zugrunde gelegt, in denen die Ereignisniederschlagssumme einen Wert größer oder gleich der Warnstufe 2 des DWD erreicht und somit als ein Pixel mit Einsatzpotenzial angesehen wird. Als meteorologische Parameter dienen pixelbasierte Attribute des katalogisierten Ereignisses: die Niederschlagssum-

me über die Ereignisdauer, der SRI, die Warnstufen des DWD, die Wiederkehrzeit sowie der 21-tägige Vorregenindex. Die geografischen Parameter entsprechen jenen der allgemeinen Korrelationsanalyse. Ergänzend wurden die Einschätzungen der Interviewpartner integriert, dabei insbesondere für die Bevölkerungsfaktoren, die nicht über entsprechende Daten abgebildet werden können, darunter z. B. das Risikobewusstsein oder der Vorsorgegrad der Bevölkerung.

7.3.1. Aachen und Wuppertal

Dieses Kapitel des Berichtes wurde etwas verändert aus der projektbegleitenden Masterarbeit von WISCHOTT (2020) übernommen. Die beiden Städtereionen Aachen und Wuppertal werden in dem Fallbeispiel gemeinsam behandelt, da sie im Hinblick auf dasselbe Starkregenereignis untersucht wurden.

Fallstudiengebiet Aachen

Die Städtereion Aachen liegt in Nordrhein-Westfalen und grenzt im Westen an Belgien und die Niederlande. In Aachen leben auf einer Fläche von 706,95 km² insgesamt 553.922 Menschen (Stand 31.01.2015). Der nördliche Teil der Städtereion Aachen lässt sich der Niederrheinischen Bucht zuordnen, während der Süden mit der Eifel einen Teil des Rheinischen Schiefergebirges bildet (GEOLOGISCHER DIENST NORDRHEIN-WESTFALEN O. J.).

Die Feuerwehren der Stadt und Städtereion Aachen sind über eine gemeinsame Leitstelle organisiert, die ihren Sitz bei der Berufsfeuerwehr Aachen hat. Die Stadt Aachen verfügt über eine Berufsfeuerwehr mit 4 Wachen und eine Freiwillige Feuerwehr mit 12 Löschzügen. In der Städtereion Aachen hingegen gibt es 9 Freiwillige Feuerwehren, die zum Teil mit hauptamtlichem Personal besetzt sind. Die Feuerwehr der Stadt Aachen zählt 463 Berufsfeuerwehrkräfte und 574 ehrenamtliche Kräfte (Stand August 2020). Die Berufsfeuerwehr der Städtereion macht 199 hauptamtliche und 1627 ehrenamtliche Kräfte aus (FEUERWEHRVERBAND KREIS AACHEN E.V. 2011, STADT AACHEN O. J.). Die ersten Einsätze bei einem Ereignis werden mit Löschfahrzeugen der Berufsfeuerwehr gefahren. Bei Zunahme der

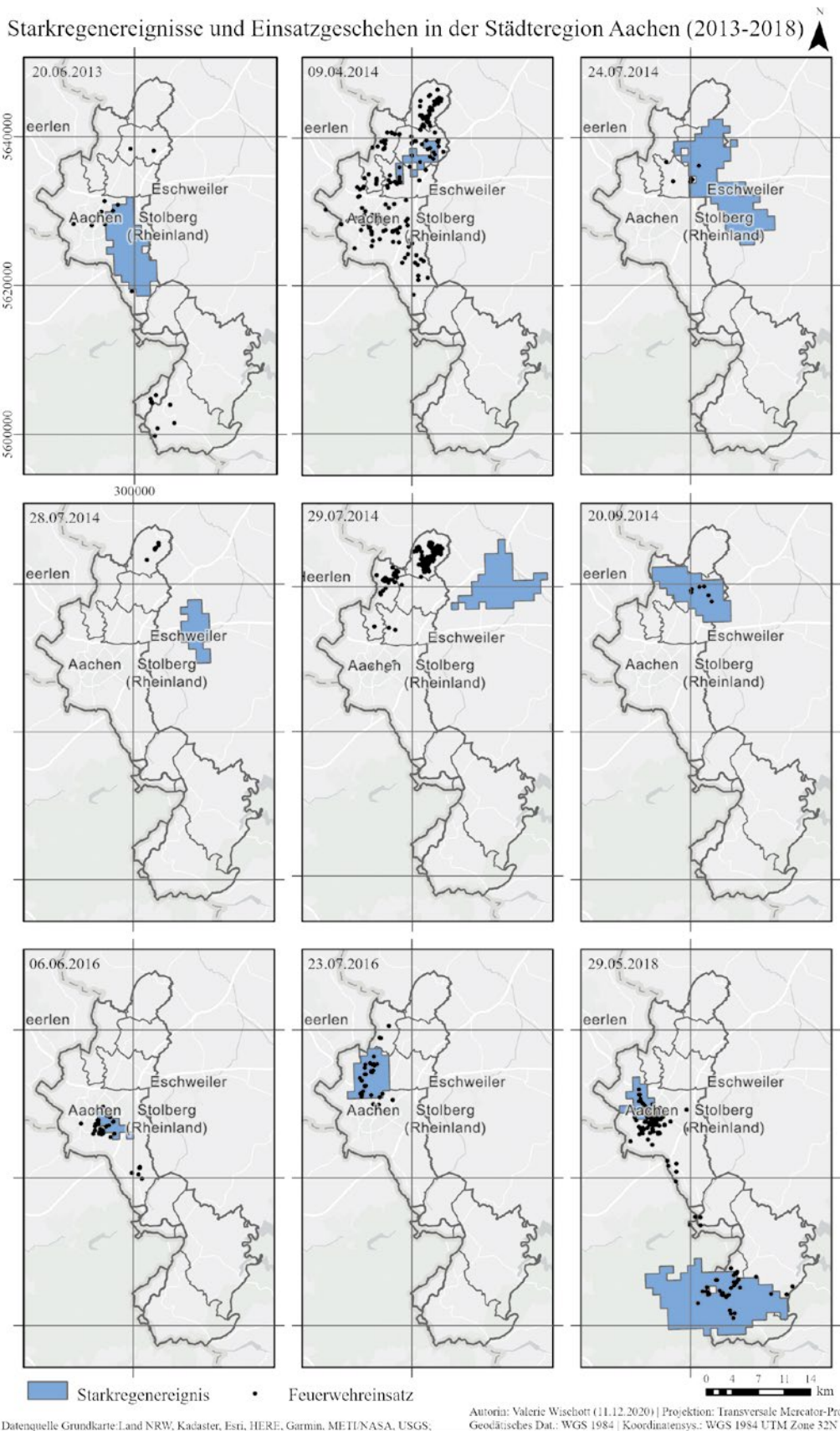


Abb. 56: Verteilung aller Starkregenerereignisse von 2013–2018 mit dazugehörigen Feuerwehreinsätzen in der Städteregion Aachen (WISCHOTT 2020). Aufgrund der nicht verfügbaren Daten für Eschweiler und Stolberg werden diese beiden Städte nicht grafisch in das Untersuchungsgebiet integriert.

Einsatzzahlen wird die Freiwillige Feuerwehr hinzugezogen, die dann den wesentlichen Teil der Einsätze ausmacht (Interview Aachen). Die Berufsfeuerwehr bleibt für den Grundschutz (z. B. Feuer, Verkehrsunfall) zuständig.

Für die Städteregion Aachen wurden aus der Ereignisdatenbank insgesamt 25 Starkregenereignisse innerhalb des Zeitraums der zur Verfügung gestellten Einsatzdaten (2013-2019) identifiziert. Nach dem Abgleich mit den Einsatzdaten der Feuerwehr blieben 10 Starkregenereignisse übrig, denen Einsätze zugeordnet werden konnten. Für 15 Starkregenereignisse ergaben sich hingegen keine korrespondierenden Einsätze. So ergibt sich insgesamt eine Zahl von 1052 Feuerwehreinsätzen, die in dem genannten Zeitraum aufgrund von Starkregenereignissen stattfanden. Die 10 Starkregenereignisse sowie die korrespondierenden Einsätze sind in Abbildung 56 dargestellt.

Fallstudiengebiet Wuppertal

Wuppertal ist die größte Stadt im Bergischen Land, Nordrhein-Westfalen, und bildet zusammen mit Remscheid und Solingen das Bergische Städtedreieck (TOURISMUS NRW o. J.). In der Stadt leben auf einer Fläche von 168,41 km² insgesamt 362.174 Menschen (Stand 31.03.2020) (STADT WUPPERTAL o. J.). Wegen ihres großen Grünflächenanteils von über einem Drittel der Gesamtfläche wird Wuppertal als grünste Großstadt Deutschlands betitelt (WESTDEUTSCHE ZEITUNG 2013). Das Stadtbild ist vor allem durch die Schwebebahn gekennzeichnet, welche die das Stadtgebiet durchfließende Wupper auf einer Strecke von 13 km begleitet (WSW mobil GmbH o. J.). Darüber hinaus sind steile Hänge und zahlreiche Treppen prägend (BERGER 2008), wobei Höhenunterschiede von etwa 250 m zwischen dem höchsten Punkt (Lichtscheid, ca. 350 m ü. NN) und dem tiefsten Punkt (an der Wupper bei Müngsten, ca. 100 m ü. NN) zutage treten (STADT WUPPERTAL o. J.).

Die Feuerwehr der Stadt Wuppertal ist in eine Berufsfeuerwehr und eine freiwillige Feuerwehr organisiert. Die Berufsfeuerwehr unterhält 3 Feuerwachen und zählt rund 400 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, davon 370 feuertechnische

Beamten und Beamte und 35 Tarifbeschäftigte für Verwaltung und Werkstätten. Die Freiwillige Feuerwehr umfasst ca. 570 aktive Einsatzkräfte mit 16 über das gesamte Stadtgebiet verteilten Löschzügen (STADT WUPPERTAL o. J., Interview Wuppertal).

Die Feuerwehr Wuppertal hält ein Konzept für Ausnahmezustände vor, unter die auch Starkregenereignisse fallen können. Ausnahmezustände werden entweder bereits im Vorfeld der Einsatzfähigkeit bei entsprechender Wetterlage ausgerufen oder sobald die Anzahl an Einsätzen einen bestimmten Schwellenwert innerhalb einer festgelegten Zeit überschreitet. Im Falle eines Ausnahmezustands wird die Freiwillige Feuerwehr alarmiert und es werden vorgeplante Einsatzabschnitte gebildet (Interview Wuppertal).

Aus der Ereignisdatenbank lassen sich für den Zeitraum von 2006 bis 2019 insgesamt 13 Starkregenereignisse identifizieren, die im Stadtgebiet Wuppertal stattgefunden haben. 10 dieser Ereignisse konnten insgesamt 1176 Einsätze der Feuerwehr zugeordnet werden (vgl. Abbildung 57), wohingegen 3 Starkregenereignisse keine Einsätze im Stadtgebiet zur Folge hatten.

Im Folgenden wird das Ereignis vom 29.05.2018 näher analysiert, das sowohl die Städteregion Aachen als auch die Stadt Wuppertal getroffen hat.

7.3.1.1. Meteorologische Ereignisbeschreibung

Deutschland lag am 29. Mai 2018 unter einem schwachen Randtrog, der sich – ausgehend von einem Höhentief über der Biskaya – weit nach Osten erstreckte. Das Bodendruckfeld wurde geprägt von Tiefdruckgebieten über West- und Südwesteuropa, von denen aus sich eine Rinne mit eingelagerter Konvergenz bis nach Deutschland erstreckte. Die Rinne war angefüllt mit feuchter und labil geschichteter Warmluft mit großem Potenzial für kräftige Gewitter. Am 29.05.2018 traten in einem breiten Streifen vom südwestlichen Niedersachsen, NRW und dem nördlichen Rheinland-Pfalz über Baden-Württemberg bis zur Alb und weiten Teilen von Bayern schwere Gewitter mit heftigem Starkregen, vereinzelt auch größerer Hagel und schwere Sturmböen, auf. Verbreitet traten Unwetterschäden auf.

Starkregenerereignisse und Einsatzaufkommen in Wuppertal (2007-2018)

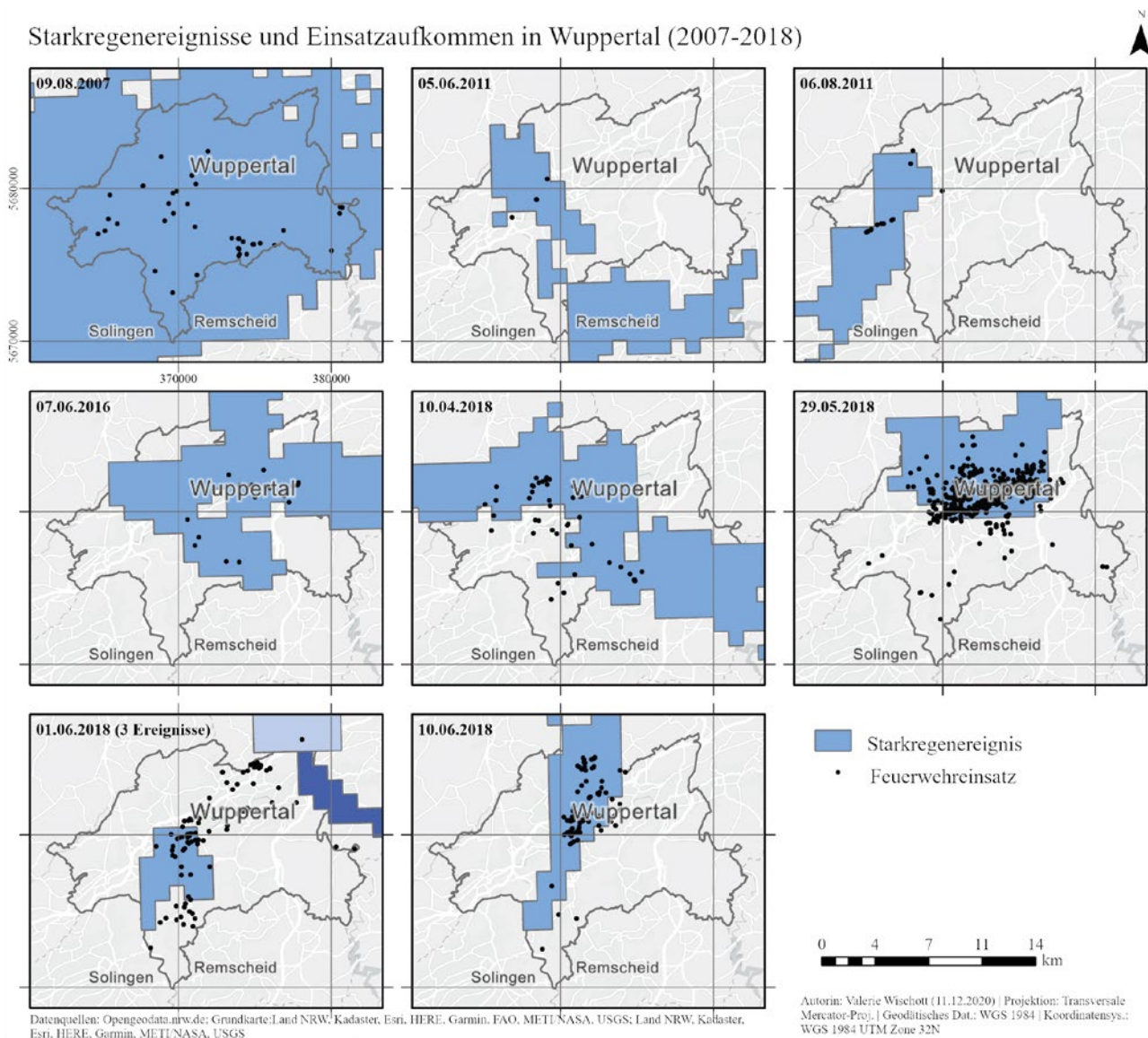


Abb. 57: Verteilung aller Starkregenerereignisse von 2007-2018 mit dazugehörigen Feuerwehreinsätzen in Wuppertal. Die unterschiedlichen Blautöne stehen für verschiedene Niederschlagszonen (Quelle: WISCHOTT 2020).

7.3.1.2. Schadensausmaß Aachen

In Aachen umfassten die Auswirkungen vollgelaufene Keller, überschwemmte Straßen sowie die Entwurzelung von Bäumen (AACHENER ZEITUNG 2018). Die meisten Schäden betrafen Gebäude und dort vor allem die beweglichen Objekte, die z. B. im Keller eingelagert waren (IP2 2020:2). Im Stadtbereich wurde ein Gullydeckel hochgedrückt und eine meterhohe Wasserfontäne verursacht (BERLINER MORGENPOST 2018). Weiterhin verursachten die Wassermassen eine Sperrung der Adenauerallee sowie eine Überschwemmung eines Lernraums der RWTH Aachen (ALFRED NE-

VEN DUMONT 2018). Es wird berichtet, dass zuerst der Südbereich der Stadt Aachen stark betroffen war, im weiteren Verlauf wurden im Stadtzentrum rund um die Altstadt sowie im Einkaufszentrum Aquis Plaza große Schäden verzeichnet. Neben Verkehrsinfrastrukturen waren auch andere Kritische Infrastrukturen von diesem Ereignis betroffen: Durch das Eindringen von Wasser in eine Trafostation ereignete sich in der Innenstadt ein zeitweiser Stromausfall (STADTPORTAL KOHLSCHIED.DE 2018). Auch für den Raum Monschau sollen viele Notrufe eingegangen sein (DPA 2018). In den Medien überwiegen jedoch die Berichte über Schäden in der Stadt Aachen.

Wuppertal

Auch zu Wuppertal wird von zahlreichen vollgelauenen Kellern, überfluteten Straßen und mehreren umgestürzten Bäumen berichtet. Der Wasserpegel der Wupper stieg innerhalb einer Stunde um nahezu 2 Meter an (Interview Wuppertal), sodass um 16:30 Uhr der Betrieb der Schwebbahn eingestellt wurde. Grund dafür waren die treibgutführenden Wassermassen unter der Schwebbahntrasse. Weitere betroffene Verkehrsinfrastrukturen zeigten sich in vom Regen überspülten Gleisen, sodass der Verkehr der Deutschen Bahn teilweise eingestellt werden musste. Zudem wurden öffentliche Gebäude in Mitleidenschaft gezogen. Es wird von einem eingestürzten Dach eines Universitätsgebäudes und mindestens 2 überfluteten Universitätsgebäuden berichtet. Weitere Schäden durch Überschwemmungen ereigneten sich in Einkaufszentren, in einem Freibad sowie an einer Tankstelle durch ein eingestürztes Dach (WESTDEUTSCHE ZEITUNG 2018B). Insgesamt entstanden Schäden in zweistelliger Millionenhöhe (WESTDEUTSCHE ZEITUNG 2018A).

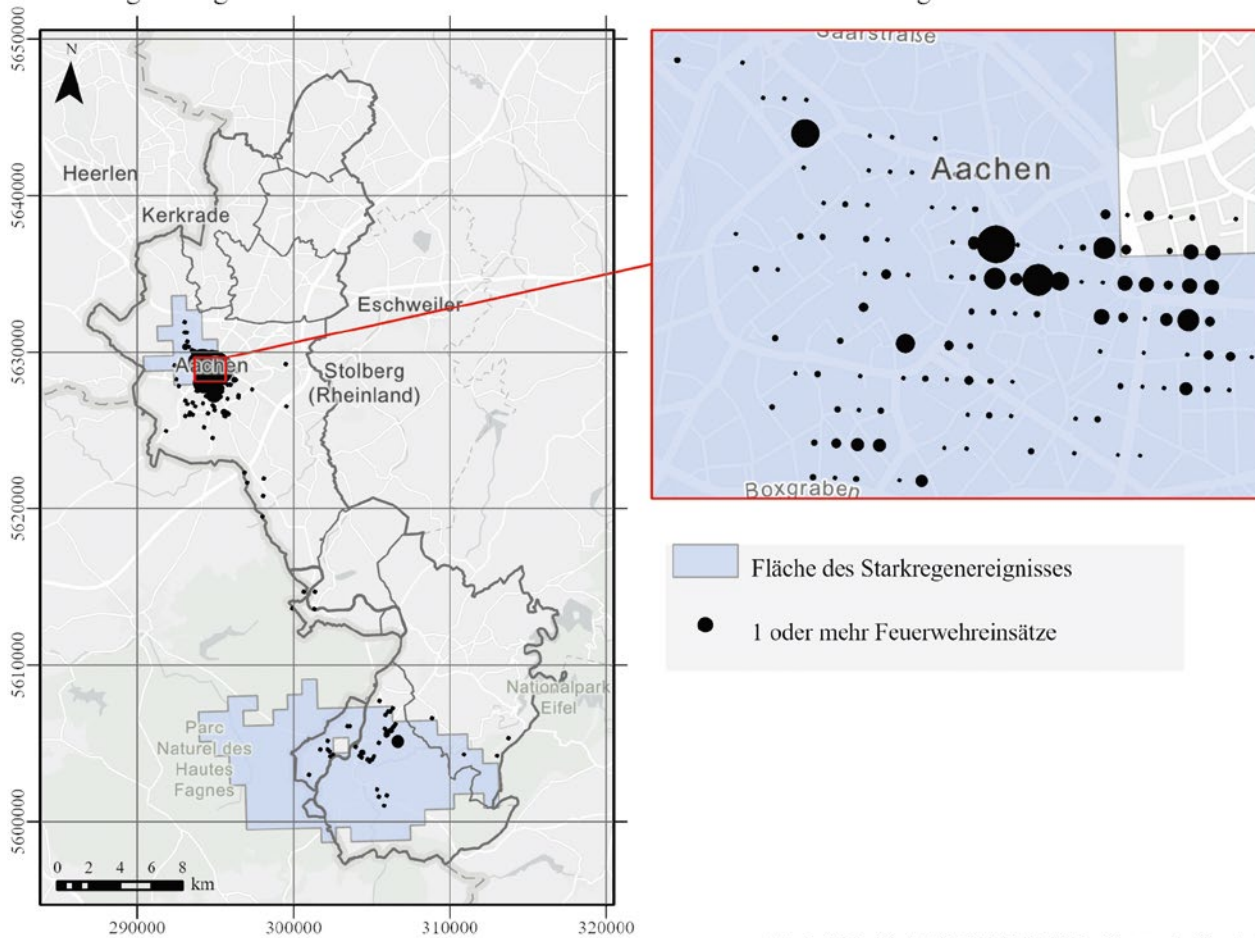
7.3.1.3. Einsatzgeschehen Aachen

In Aachen und Monschau gab es infolge der beiden Starkregenereignisse am 29.05.2018 eine Gesamtzahl von 457 Einsätzen, wobei allein zwischen 15:00 und 16:30 Uhr MESZ (13:00-14:30 Uhr UTC) 400 Notrufe bei der Feuerwehr Aachen eingingen (THW ORTSVERBAND AACHEN 2018). Nach Ende des Starkregenereignisses gegen 16:30 Uhr waren noch immer über 230 Notrufe unerledigt (STADTPORTAL KOHLSCHIED.DE 2018). Bei der Bewältigung der Ereignisse wurde Unterstützung aus den Nachbarkommunen Stolberg, Eschweiler, Herzogenrath, Würselen und Baesweiler angefragt (STADTPORTAL KOHLSCHIED.DE 2018). Die Zusammenarbeit mit der Freiwilligen Feuerwehr der Städteregion Aachen, die dem Prinzip der überörtlichen Hilfe folgte, wurde als erfolgreich bewertet (Interview Aachen). Zusätzlich wurde um 16:30 Uhr das THW alarmiert, aus dem insgesamt 72 Kräfte unterstützten (THW ORTSVERBAND AACHEN 2018). Das THW wurde aufgrund seiner leistungsfähigeren Pumpen gezielt für die überflutete Tiefgarage des Einkaufszentrums Aquis Plaza angefordert (Interview Aachen). Aufgrund der Zuständigkeit der interviewten Person für die

Stadt Aachen konnten keine Angaben zur Einsatz-tätigkeit in der Stadt Monschau für dieses Starkregenereignis gemacht werden.

Von den insgesamt 458 Einsätzen fanden 403 in der Stadt Aachen und 54 rund um die Region Monschau statt (Abbildung 58). Die Einsatzpunkte in der Stadt Monschau befanden sich größtenteils innerhalb der Ereignisfläche, während in der Stadt Aachen auch außerhalb, insbesondere südlich der Ereignisfläche, eine Vielzahl an Einsätzen festzustellen ist. Innerhalb der Stadt Aachen war ein Großteil der Einsätze im zentralen Stadtgebiet zu verorten, genauer: innerhalb des äußeren Stadtringes nach Osten hinziehend. Besonders betroffen war die Region um den Kaiserplatz (Interview Aachen). Die gleichmäßigen Abstände zwischen den Einsatzdatenpunkten sind auf die Datenrundung von 100 Metern zurückzuführen, aufgrund der auch eine punktgenaue Verortung der Einsätze nicht möglich war. Aufgrund der Datenrundung sind in einigen Fällen mehrere Einsätze mit denselben Koordinaten versehen. Aus diesem Grund wurde eine zur Anzahl der Einsätze proportionale Größendarstellung der Einsatzstellen gewählt. Größere Punkte zeigen eine größere Anzahl an Einsätzen an dieser Stelle an. So lassen sich Schwerpunktgebiete identifizieren, die sich insbesondere im Osten des Stadtgebietes rund um den Adalbertsteinweg, die Adalbertstraße, die Peterstraße sowie um die Gegend des Kaiserplatzes befanden (Interview Aachen). Innerhalb von Monschau fallen kleinere Häufungen in der Innenstadt von Monschau sowie im Stadtteil Imgenbroich auf. In der Stadt Aachen fällt in der zeitlichen Abfolge der Einsätze eine Tendenz der räumlichen Orientierung von Süden nach Norden auf, die der Zugrichtung des Niederschlags (entsprechend ergänzend ausgewerteter RADKLIM-Daten) entspricht. Dieses Bild zeichnet sich auch in der Wahrnehmung der Feuerwehr Aachen ab (Interview Aachen). Der letzte Einsatz in der Stadt Monschau wurde um 15:54 Uhr registriert, rund 3 Stunden nach Ereignisende. Die Einsatz-tätigkeit in der Stadt Aachen fand 6 Stunden nach Ereignisende, um 20:23 Uhr, ihren Abschluss.

Starkregenereignis am 29.05.2018 und Einsatzaufkommen in der Städtereion Aachen



Datenquelle: Grundkarte: Land NRW, Kataster, Esri, HERE, Garmin, INCREMENT P, METI, NASA, USGS;

Autorin: Valerie Wischott (11.12.2020) | Projektion: Transversale Mercator-Proj. Geodätisches Dat.: WGS 1984 | Koordinatensys.: WGS 1984 UTM Zone 32N

Abb. 58: Einsatzaufkommen in Aachen und Monschau (südlich) am 29.05.2018 mit Schwerpunkten rund um die Region des Kaiserplatzes (Quelle: WISCHOTT 2020).

Wuppertal

In Wuppertal hatte das Starkregenereignis insgesamt 845 Feuerwehreinsätze zur Folge. Die Einsatzfähigkeit setzte etwa 40 Minuten nach Beginn des Starkregenereignisses (12:50 Uhr) mit einer zunächst noch geringen Anzahl von Einsätzen ein. In der zweiten Stunde des Ereignisses stieg die Anzahl der Einsätze sprunghaft auf insgesamt 170 an. Die Mehrzahl der Einsätze fand dabei in den Gebieten mit hohen Niederschlagssummen statt. Die beiden darauffolgenden Stunden waren weiterhin von einem hohen Einsatzaufkommen geprägt, mit 147 Einsätzen zwischen 14:50 und 15:50 Uhr sowie 113 Einsätzen zwischen 15:50 und 16:50 Uhr. In den nächsten Stunden nahm die Anzahl der Einsätze ab, bis sie ab 21:50 Uhr im einstelligen Bereich lag. In den frühen Morgen-

stunden des 30.05.2018 war ab 04:50 Uhr wieder ein geringer Anstieg zu verzeichnen. Der letzte Einsatz wurde am 30.05.2018 um 18:10 Uhr registriert und fand somit mehr als 24 Stunden nach Ereignisende statt.

Die Bewältigung des Ereignisses war neben den Wassereinsätzen von zahlreichen Primäreinsätzen geprägt, z. B. durch die o. g. Teileinstürze der Gebäude, durch Brandmeldungen und Meldungen über Gasgerüche. Ein Großteil der Einsatzkräfte war somit zunächst in die Bewältigung dieser Primäreinsätze eingebunden (Interview Aachen). Dadurch war eine zeitnahe und gezielte Abarbeitung der anfallenden Wassereinsätze zu Anfang nicht möglich, u. a. da auch die gezielte Einteilung in Einsatzabschnitte, wie sie von der

Feuerwehr Wuppertal als gängiges Prozedere bei der Bewältigung von Starkregenereignissen beschrieben wurde, nicht realisiert werden konnte. Erst die Nachführung weiterer Einsatzkräfte aus den Nachbarstädten ermöglichte die Abarbeitung der Einsätze nach Einsatzabschnitten (Interview Aachen). Eine der größten Herausforderungen bei der Bewältigung lag darin, aus der Vielzahl der Meldungen Schwerpunkte herauszufiltern, um diese vorrangig abarbeiten zu können.

Abbildung 59 stellt die Verteilung aller 845 Einsätze im Stadtgebiet Wuppertal dar. Es ist festzustellen, dass sich die Einsätze mehrheitlich im südlichen Teil der Starkregenereignisfläche sammelten und dort schwerpunktmäßig in den Innenstadtbereichen von Barmen und Elberfeld stattfanden (Interview Aachen). Die Verteilung konzentrierte sich um die Bereiche der Wupper sowie entlang von Straßenzügen. Auch innerhalb der Stadtbezirke sind Schwerpunkte erkennbar.

Starkregenereignis am 29.05.2018 und Einsatzaufkommen in Wuppertal

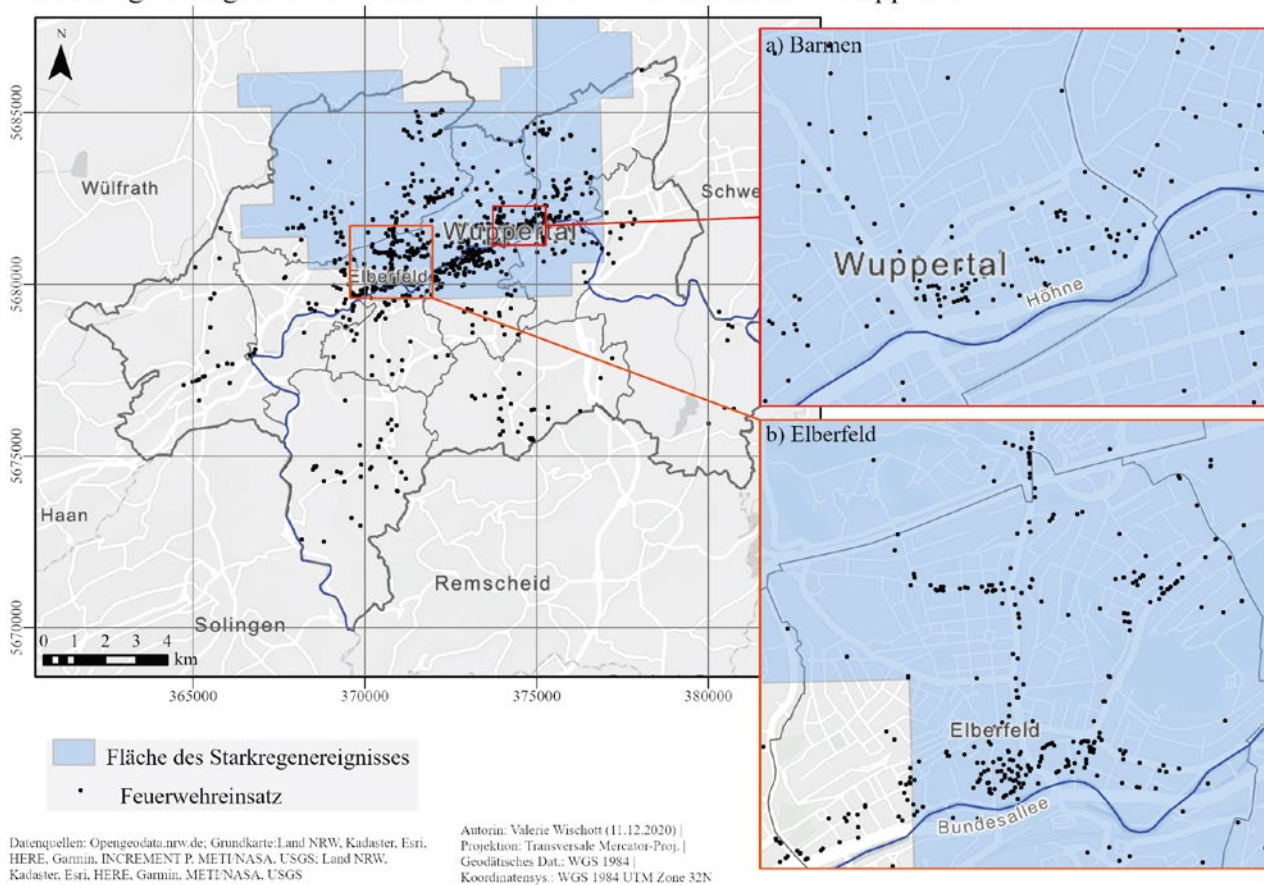


Abb. 59: Einsatzaufkommen in Wuppertal infolge des Starkregenereignisses am 29.05.2018.

a) Schwerpunkte nördlich der Wupper um den Bereich Alter Markt in Barmen; b) Schwerpunkte rund um den Bereich Kirchplatz und nördlich davon entlang der Gathe (Quelle: WISCHOTT 2020).

7.3.1.4. Analyse von Einflussfaktoren auf die Bildung von Einsatzschwerpunkten

a) Ergebnisse der Korrelationsrechnungen

Aachen

Die visuelle Betrachtung der Einsatzdatenpunkte in Abbildung 60 zeigt, dass sich ein Großteil der

Einsätze innerhalb des Bereichs mit der höchsten Niederschlagssumme befindet, dass aber auch außerhalb dessen Einsatzschwerpunkte zu finden sind. Die Korrelationsrechnung (vgl. Tabelle 10) bestätigt einen mittleren bis hohen signifikanten Einfluss der Niederschlagssumme und der Niederschlagsdauer (-stunden) auf die Zahl der

Einsätze am Ereignistag. Auch die Intensität des Niederschlags hatte der Korrelation mit dem Starkregenindex und der Wiederkehrzeit zufolge einen mittelstarken Einfluss.

Im Stadtgebiet Aachen befinden sich die Einsätze vor allem in der Landnutzungs-kategorie der „urban fabric“ (rot), also des urbanisierten Raumes. Dies wird durch die hohen Korrelationen zwischen der Zahl der Einsätze und der Einwohnerzahl, dem

Siedlungsgrad und dem Versiegelungsgrad bestätigt. Das Geländemodell lässt in Verbindung mit dem Topographic Position Index (TPI) außerdem erkennen, dass sich die Einsatzpunkte überwiegend in einem niedriger gelegenen Bereich (100-200 m ü. NN) und somit in Senken befinden. Die Korrelation zeigt bezüglich des TPI und der Geländehöhe einen schwach negativen, aber nicht signifikanten Zusammenhang.

Niederschlagsereignis		Aachen		Wuppertal	
		29.05.2018 (D = 1 h, 12:50)		29.05.2018 (D = 2 h, 12:50)	
URBANISIERUNG	Einwohnerzahl (Summe/1 km ²)	0,66	***	0,64	***
	Versiegelungsgrad (% pro 1 km ²)	0,68	***	0,71	***
	Siedlungsgrad (% pro 1 km ²)	0,61	***	0,63	***
TOPOGRAFIE	Geländehöhe (Median aus 1 km ²)	-0,20	-	-0,55	***
	Topographic Position Index (Median aus 1 km ²)	-0,29	-	-0,53	***
EREIGNIS-ATTRIBUTE 1. Ereignis	Niederschlagssumme über Ereignisdauer	0,25	-	0,24	*
	Starkregenindex nach Schmitt	0,38	**	0,27	*
	Warnstufe DWD (2/3/4)	0,30	*	0,28	**
	Wiederkehrzeit nach RADKLIM	0,44	**	0,04	-
	21-tägiger Vorregenindex	-0,42	**	-0,31	**

Tab. 10: Korrelationsrechnungen für Aachen und Wuppertal

Die rötliche Einfärbung steht für einen positiven, die bläuliche für einen negativen Zusammenhang. Je dunkler die Einfärbung, desto stärker der Zusammenhang. Die Signifikanz der Korrelation wird jeweils in der 2. Spalte abgebildet, wobei * p < 0,05 (95 %), ** p < 0,01 (99 %), *** p < 0,001 (99,9 %), - nicht signifikant (p > 0,05).

Wuppertal

Für Wuppertal zeigen sich ebenfalls gering positive, signifikante Korrelationen zwischen der Zahl der Einsätze und den meteorologischen Parametern, wobei die Stärke des Zusammenhangs etwas geringer ausfällt als für Aachen (vgl. Tabelle 10). Gemäß Abbildung 61 verteilen sich die Einsatzstellen sowohl auf Gebiete mit maximalen Niederschlagssummen als auch auf Gebiete mit mittlerer Niederschlagssumme. Vorwiegend ist aber eine Verteilung auf Bereiche mit den höchsten DWD-Warnstufen 3 und 4 erkennbar.

Hinsichtlich der Siedlungsfaktoren zeigt sich für Wuppertal ein starker Zusammenhang zur räumlichen Verteilung der Einsätze. Besonders der Versiegelungsgrad tritt mit $r = 0,71$ als maßgeblich für die Herausbildung von Einsatzstellen hervor. Wie in keinem anderen Fallstudiengebiet hat aber auch die Topografie in Wuppertal einen sehr hohen Einfluss. Sowohl zur absoluten Geländehöhe als auch zum Topographic Position Index (TPI) zeigen sich hohe signifikante negative Korrelationen. Demzufolge häuft sich die Zahl der Einsätze besonders in den niedriger gelegenen Bereichen bzw. in Senkenlagen, was dafür spricht, dass das aus den umliegenden Erhebungen zusammenfließende Wasser in Wuppertal ein hohes Schadenspotenzial hat. Auch die Tatsache, dass damit zugleich ein Anstieg im Pegel der Wupper bewirkt wird, dürfte in die hohe Gefährdung in den Senkenbereichen und die Vielzahl der dadurch hervorgerufenen Einsätze einfließen.

b) Ergebnisse der Bewertung durch die Interviewpartner

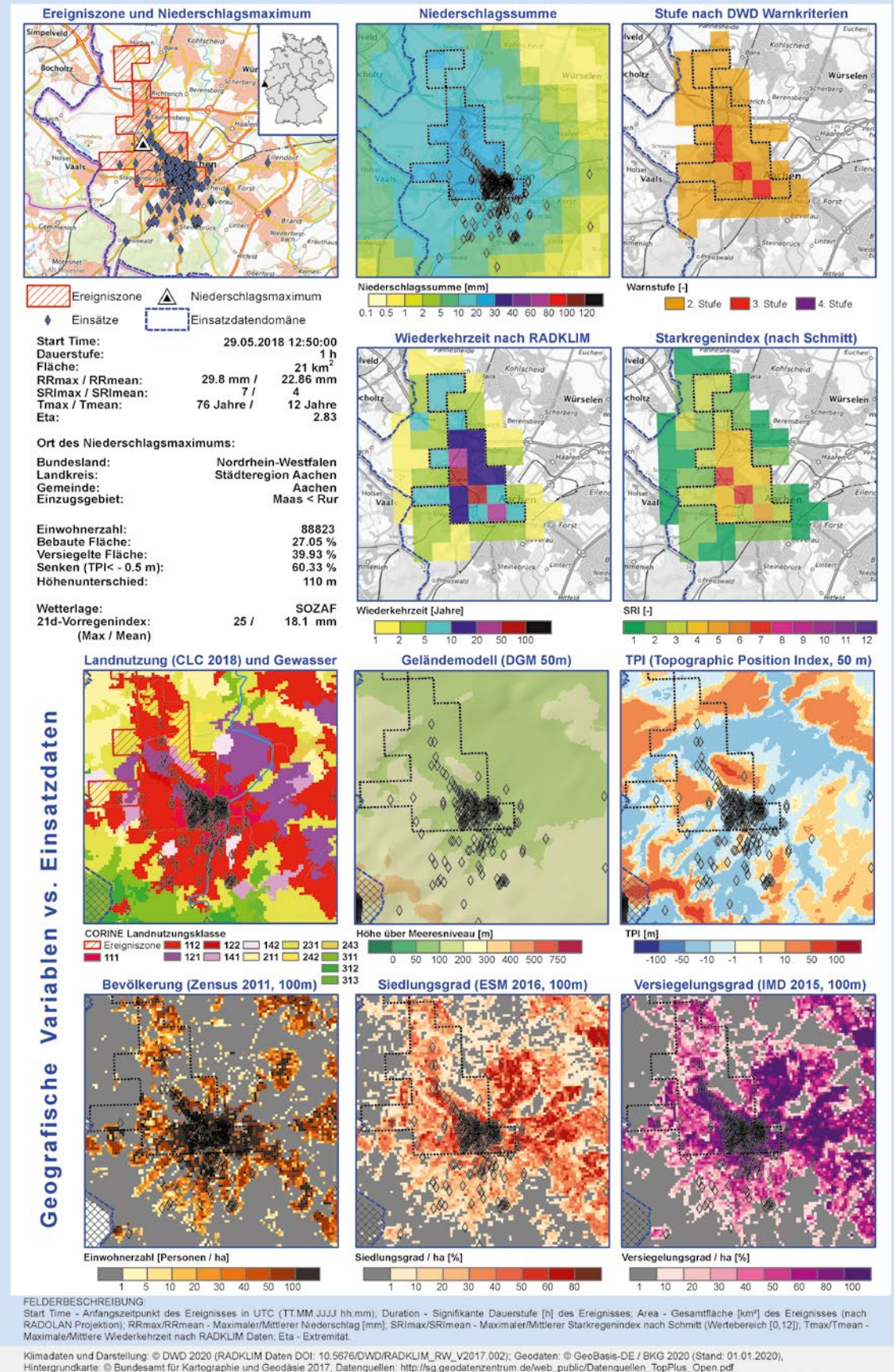
Da die Bewertung der Einflussfaktoren für das konkrete Ereignis schwer von der Bewertung ihrer generellen Bedeutung zu trennen war, spiegeln die folgenden Ausführungen sowohl Besonderheiten des betrachteten Ereignisses als auch darüber hinausgehende Erfahrungen mit den jeweiligen Faktoren wider.

Da für Wuppertal keine Bewertungen vorgenommen wurden, werden diese im Folgenden nur für die Städteregion Aachen ausgeführt.

Aus praxisnaher Perspektive wurde die Niederschlagsmenge/-intensität generell und bezogen auf das betrachtete Ereignis als starker meteorologischer Einflussfaktor eingeschätzt, dies insbesondere in Kombination mit weiteren Faktoren. Zum Beispiel wurde auch die Art des Niederschlags als relevant betrachtet. Während des Ereignisses trat auch starker Hagel auf, der als ausschlaggebend für viele der resultierenden Schäden bzw. Einsätze angesehen wurde, da er an zahlreichen Stellen das Abfließen des Wassers verhinderte. Die dadurch verzögert nachfließenden und sehr großen Wassermassen hätten demnach erst die Kapazität der Kanalisation überstiegen. Dementsprechend hoch wurden auch die Bildung von Oberflächenabfluss und die Leistungsfähigkeit der Kanalisation als einflussgebend bewertet (vgl. Abbildung 62). Auch der Bebauungsstruktur wurde ein starker Einfluss beigemessen, während die physisch-geografischen Parameter Geländeform und Bodeneigenschaften mit einem eher schwachen bis mittleren Einfluss eingestuft wurden.

Als besonders relevant wurde von der Feuerwehr Aachen generell die Selbsthilfefähigkeit der Bevölkerung bei der Bewältigung eines Ereignisses hervorgehoben. Die entstehenden Schäden werden als umso geringer eingestuft, je besser sich die Bevölkerung in solchen Situationen selbst helfen kann. Beispielhaft wurde als einfache Maßnahme eine Tauchpumpe genannt, mit welcher der Wasserpegel im häufig betroffenen Keller eigenständig konstant gehalten werden könne (Interview Aachen). Die Vorsorgemaßnahmen hingegen wurden mit einem geringen Einfluss bewertet. Akute Maßnahmen wie das Positionieren von Sandsäcken werden durch die Kurzfristigkeit von Starkregenereignissen als schwierig angesehen, im baulichen Bereich dagegen eher Möglichkeiten der Vorsorge erkannt. Aufgrund der als zu gering angesehenen Vorhersagbarkeit von Starkregenereignissen wird auch die rechtzeitige Warnung der Bevölkerung nicht als ein Faktor betrachtet, der die entstehenden Schäden und damit das Einsatzaufkommen entscheidend beeinflussen könnte. Der Einfluss soziodemografischer und -ökonomischer Merkmale (z. B. Alter, Einkommenshöhe, Bildungsgrad) wird ebenfalls als gering eingestuft.

Starkregen in Aachen am 29. Mai 2018 - Ereignisfallstudium



Landnutzung (CLC 2018) und Gewässer

CORINE Landnutzungs-kategorie

■	Ereigniszone	112	122	142	231	243
■	111	121	141	211	242	311
■						312
■						313

Geländemodell (DGM 50m)

Höhe über Meeresniveau [m]

0 50 100 200 300 400 500 750

TPI (Topographic Position Index, 50m)

TPI [m]

-100 -50 -10 -1 1 10 50 100

Bevölkerung (Zensus 2011, 100m)

Einwohnerzahl [Personen / ha]

1 5 10 20 30 40 50 100

Siedlungsgrad (ESM 2016, 100m)

Siedlungsgrad / ha [%]

1 10 20 30 40 50 60 80

Versiegelungsgrad (IMD 2015, 100m)

Versiegelungsgrad / ha [%]

1 10 20 30 40 50 60 80 100

FELDERBESCHREIBUNG

Start Time - Anfangszeitpunkt des Ereignisses in UTC (TT.MM.JJJJ hh:mm); Duration - Signifikante Dauerstufe [h] des Ereignisses; Area - Gesamtfläche [km²] des Ereignisses (nach RADOLAN Projektion); RRmax/RRmean - Maximaler/Mittlerer Niederschlag [mm]; SRImax/SRImean - Maximaler/Mittlerer Starkregenindex nach Schmitt (Wertebereich [0,12]); Tmax/Tmean - Maximaler/Mittlerer Wiederkehrzeit nach RADKLIM Daten; Eta - Extremität.

Klimadaten und Darstellung: © DWD 2020 (RADKLIM Daten DOI: 10.5676/DWD/RADKLIM_RW_V2017.002); Geodaten: © GeoBasis-DE / BKG 2020 (Stand: 01.01.2020), Hintergrundkarte: © Bundesamt für Kartographie und Geodäsie 2017, Datenquellen: http://sg.geodatenzentrum.de/web_public/Datenquellen_TopPlus_Open.pdf

Abb. 60: Factsheet zum Ereignis vom 29. Mai 2018 in Aachen.

Starkregen in Wuppertal am 29. Mai 2018 - Ereignisfallstudium

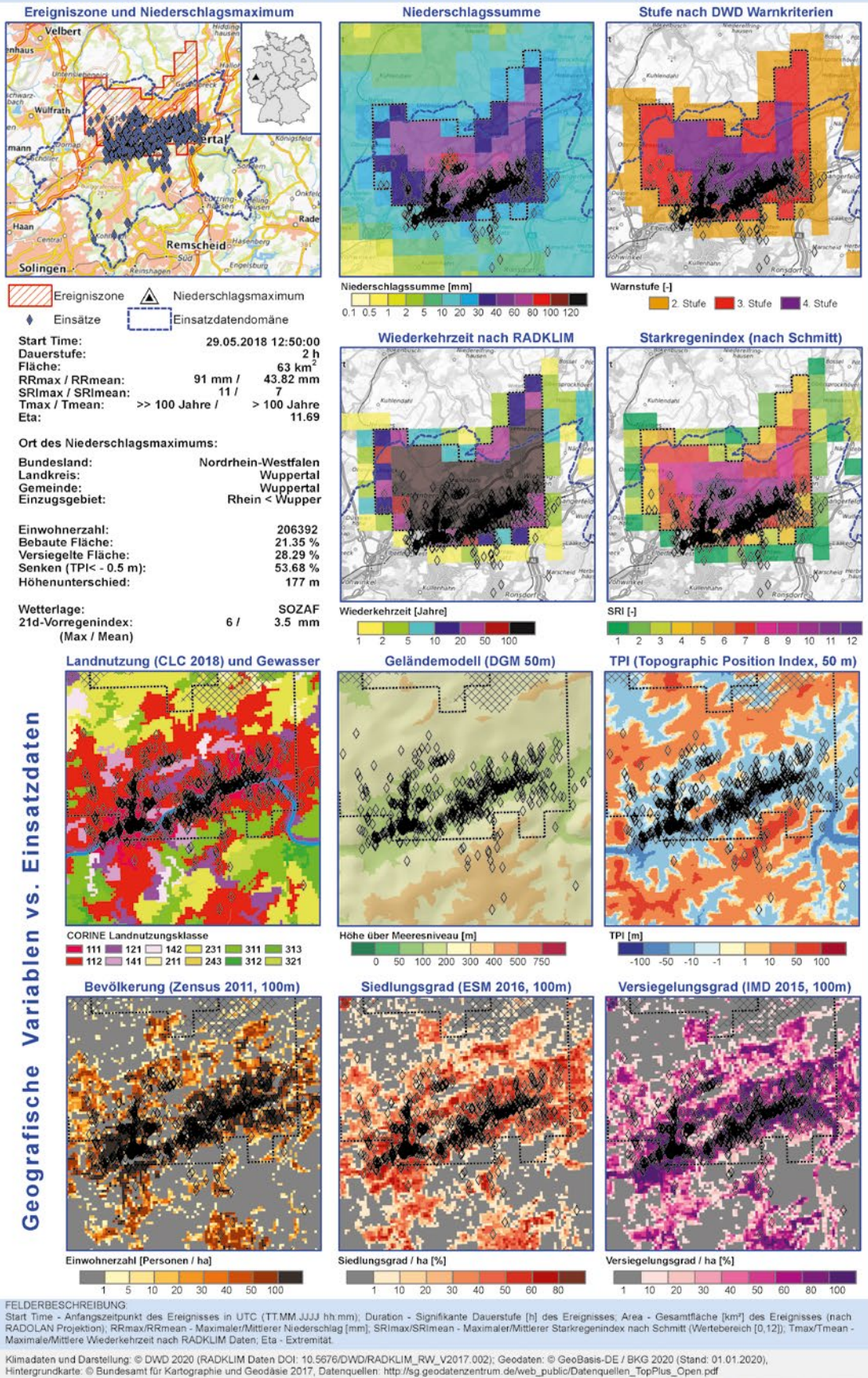


Abb. 61: Factsheet zum Ereignis vom 29. Mai 2018 in Wuppertal.

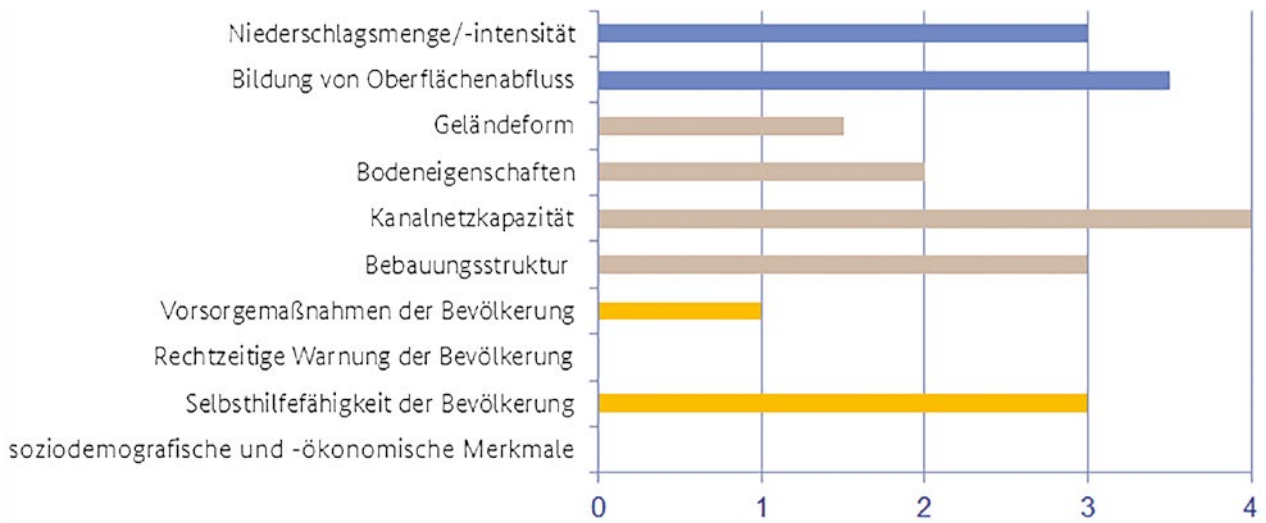


Abb. 62: Beurteilung von Einflussfaktoren auf die Herausbildung von Einsatzstellen bei Starkregen aus Sicht des Interviewpartners der Feuerwehr Aachen. Der Wert 0 steht für keinen Einfluss, 4 für einen sehr starken Einfluss. Im Gegensatz zu den noch folgenden Fallstudien wurden hierbei einige Faktoren von der Bewertung ausgenommen, da diesbezüglich keine fundierte Einschätzung möglich war.

7.3.2. Bad Doberan

Bad Doberan liegt in Mecklenburg-Vorpommern unweit von Rostock. In der Stadt direkt an der Ostsee leben auf einer Fläche von 32,9 km² rund 12.500 Menschen (Stand 2018, TILASTO 2018). Die Freiwillige Feuerwehr in Bad Doberan besteht aktuell aus 48 ehrenamtlichen Helferinnen

und Helfern. Die Einsätze werden u. a. online in einer frei verfügbaren Datenbank gelistet und in grobe Klassen wie „TH Wasserschaden“ unterteilt. Somit war – wie bei der Mehrzahl der übrigen zur Verfügung gestellten Einsatzdaten – eine genauere Analyse – wie in Kapitel 6.2.2 beschrieben – nötig, um starkregenbedingte Einsätze identifizieren zu können.

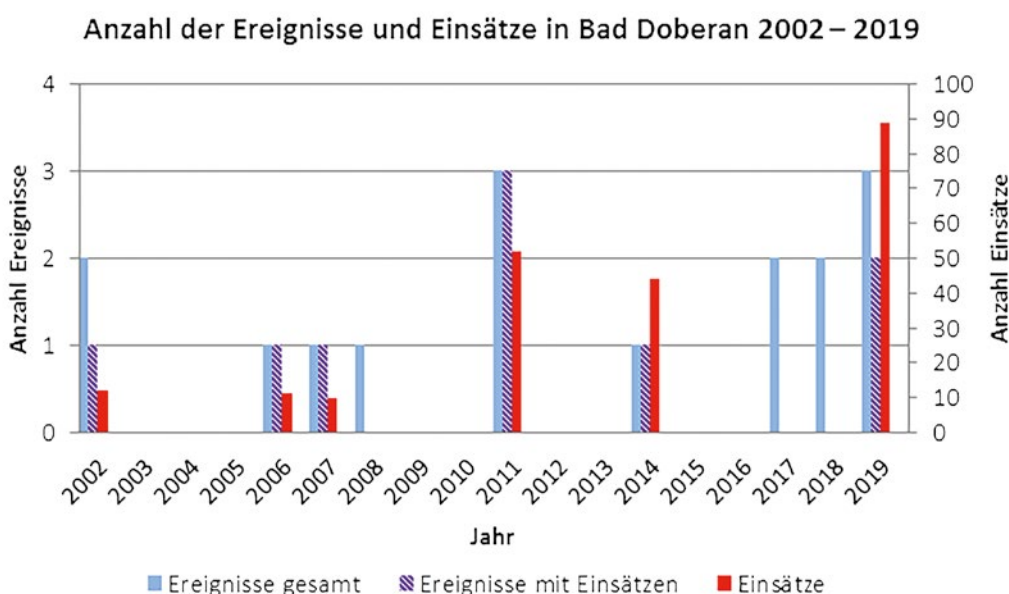


Abb. 63: Anzahl der Ereignisse und Einsätze in Bad Doberan für die Jahre 2002 – 2019. Die schraffierten Balken geben die Anzahl der Ereignisse aus der Gesamtzahl der das Gebiet schneidenden Ereignisse wieder, denen die Einsätze zugeordnet werden konnten.

In dem betrachteten Zeitraum 2002 bis 2019 gab es in Bad Doberan insgesamt 16 Starkregenereignisse, von denen 9 Ereignisse insgesamt 218 Einsätze der Feuerwehr zur Folge hatten (siehe Abbildung 63). Besonders betroffen waren die Jahre 2011 mit 3 Starkregenereignissen und 52 Einsätzen sowie 2019, wobei 2 der 3 Ereignisse insgesamt 89 Einsätze auslösten. Von diesen Ereignissen soll im Folgenden das Geschehen am 31. Juli 2019 näher ausgeführt werden.

7.3.2.1. Meteorologische Ereignisbeschreibung

Im Nordosten Deutschlands lag am 30. Juli 2019 eine sehr feuchte Luftmasse. Am Nachmittag bildeten sich lokal Gewitterzellen, die auf-

grund der hohen Feuchtwerte und der langsamen Verlagerungsgeschwindigkeiten extreme Niederschlagsmengen mit sich brachten. Am 31. Juli 2019 überquerte der Ausläufer eines Tiefs mit Kern über Ostengland und der Nordsee Deutschland allmählich ostwärts. Präfrontal befand sich über dem Norden, Osten sowie Südosten Deutschlands eine warme und vor allem relativ feuchte Luftmasse. Vorderseitig einer Kaltfront entwickelten sich im Bereich einer warmen und relativ feuchten Luftmasse im Norden und Osten Deutschlands einzelne, teils linienhaft organisierte Gewitter, die aufgrund eines heftigen Starkregens mit Regenmengen über 25 mm in kurzer Zeit lokal unwetterartig ausfielen.

7.3.2.2. Schadensausmaß

In Schleswig-Holstein hatte das Ereignis großflächige Überschwemmungen auf Straßen und vollgelaufene Keller zur Folge; das Rockfestival „Wacken“ musste unterbrochen werden. In Berlin kam es zu überfluteten Straßen und Störungen im Bahnverkehr (NORDKURIER 2019). In Bad Doberan mussten aufgrund der heftigen Regenfälle unter anderem rund 60 vollgelaufene Keller ausgepumpt werden; übergelaufene Gullys, unter Wasser stehende Straßenzüge und Äste auf den Wegen waren durch die Feuerwehr zu bewältigen. Ein Wohnhaus stand so stark unter Wasser, dass die Bewohner ihre Wohnungen verlassen und anderweitig untergebracht werden mussten. Supermärkte mussten früher schließen, da das Wasser bis in den Verkaufsraum gelangt war (OZ 2019).

7.3.2.3. Einsatzgeschehen

Unmittelbar nach Beginn des Starkregenereignisses gegen 16 Uhr ging die erste Einsatzmeldung bei der Freiwilligen Feuerwehr Bad Doberan ein. Darauf folgten weitere 75 Einsätze in einem Zeitraum von rund 7,5 Stunden. Der letzte Einsatz wurde um 23:20 Uhr ausgerufen. Insbesondere in der fünften Stunde nach der ersten Alarmierung trat mit 54 Einsätzen pro Stunde eine starke Häufung auf. Der Schwerpunkt lag dabei vor allem in der Innenstadt von Bad Doberan (siehe Abbildung 64). Die meisten Einsätze konnten in unter einer Stunde bewältigt werden. Durch den starken Anstieg der Notrufmeldungen in kurzer Zeit rückten das THW und das DRK zur Unterstützung an (FREIWILLIGE FEUERWEHR BAD DOBERAN 2019).

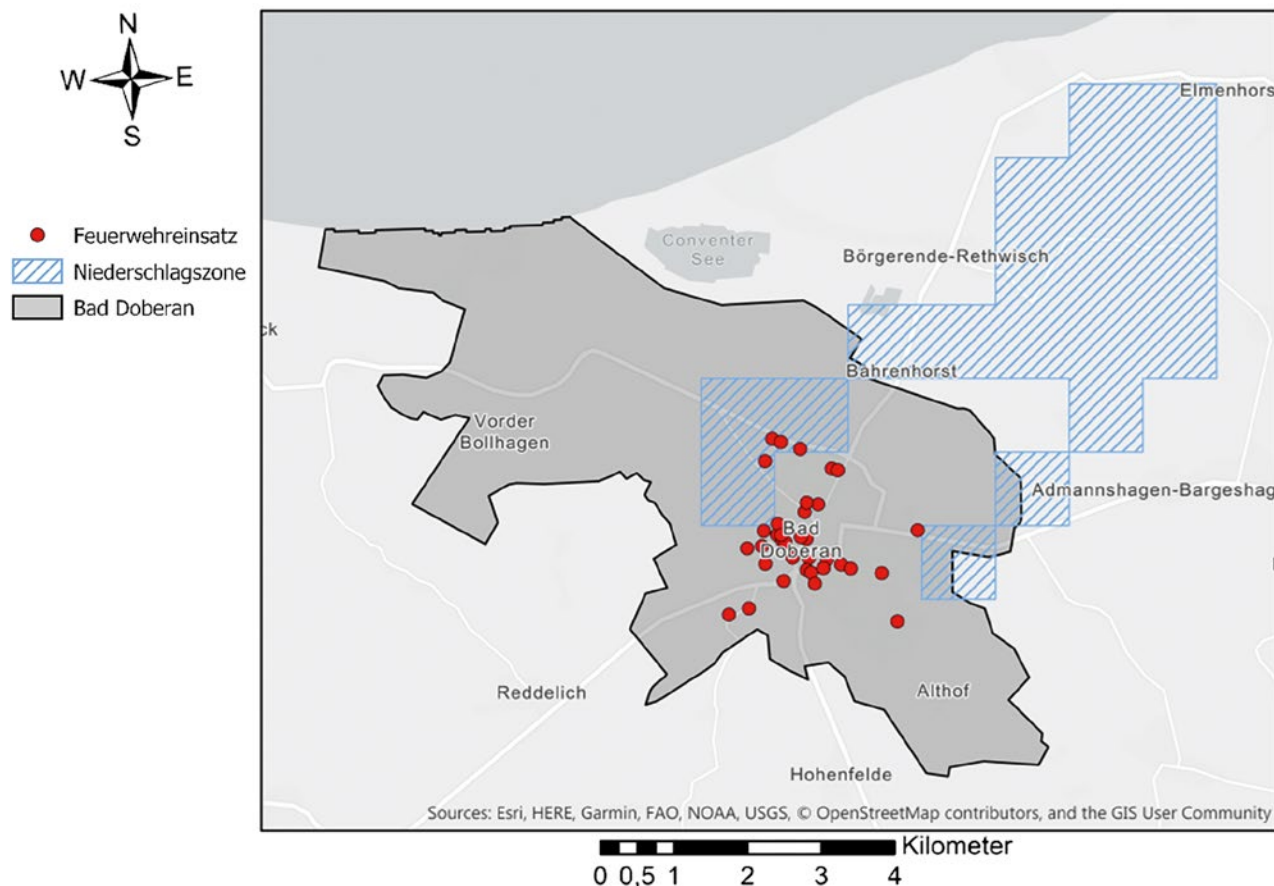


Abb. 64: Verteilung der Einsätze in Bad Doberan am 31.07.2019. Zu sehen ist eine starke Häufung im Stadtgebiet von Bad Doberan (Quelle der Karte: GADM 2018).

7.3.2.4. Analyse von Einflussfaktoren auf die Bildung von Einsatzschwerpunkten

a) Ergebnisse der Korrelationsrechnungen

Ein Blick auf die grafische Darstellung der Einsatzdatenpunkte zeigt, dass sich diese im Schwerpunkt jenseits der von dem Ereignis am stärksten betroffenen Gebiete weiter nordöstlich befinden (vgl. Abbildung 66). Die Korrelationsanalyse zeigt demnach für den ersten Ereignistag keinen nennenswerten Zusammenhang zwischen dem

Einsatzgeschehen und den meteorologischen Parametern (vgl. Tabelle 11). Für den zweiten Ereignistag lässt sich dagegen für den Starkregenindex und die DWD-Warnstufe ein moderater negativer Zusammenhang ermitteln. Einschränkend muss allerdings auch hierbei hinzugefügt werden, dass keine Einsatzdaten zu dem am stärksten von dem Ereignis betroffenen Gebiet vorlagen, sodass dahin gehend keine genauere Untersuchung vorgenommen werden konnte.

		Bad Doberan	
		29.05.2018 (D = 1 h, 12:50)	
		31.07.2019 (D = 1 h, 15:50)	
1. Niederschlagsereignis			
2. Niederschlagsereignis			
URBANISIERUNG	Einwohnerzahl (Summe/1 km ²)	0,59	***
	Versiegelungsgrad (% , pro 1 km ²)	0,62	***
	Siedlungsgrad (% , pro 1 km ²)	0,62	***
TOPOGRAFIE	Geländehöhe (Median aus 1 km ²)	0,18	–
	Topographic Position Index (Median aus 1 km ²)	-0,25	–
EREIGNIS-ATTRIBUTE	Niederschlagssumme über Ereignisdauer	-0,04	–
	Starkregenindex nach Schmitt	-0,05	–
1. Ereignis	Warnstufe DWD (2/3/4)	0,07	–
	Wiederkehrzeit nach RADKLIM-Daten	-0,04	–
	21-tägiger Vorregenindex	-0,04	–
	2. Ereignis	Niederschlagssumme über Ereignisdauer	-0,25
	Starkregenindex nach Schmitt	-0,28	*
	Warnstufe DWD (2/3/4)	-0,34	*
	Wiederkehrzeit nach RADKLIM-Daten	-0,12	–
	21-tägiger Vorregenindex	0,23	–

Tab. 11: Korrelationsrechnungen für Bad Doberan

Die rötliche Einfärbung steht für einen positiven, die bläuliche für einen negativen Zusammenhang. Je dunkler die Einfärbung, desto stärker der Zusammenhang. Die Signifikanz der Korrelation wird jeweils in der 2. Spalte abgebildet, wobei * $p < 0,05$ (95 %), ** $p < 0,01$ (99 %), *** $p < 0,001$ (99,9 %), – nicht signifikant.

Darüber hinaus ist ein etwas erhöhter, jedoch nicht signifikanter Wert bezüglich des Vorregindex festzustellen, was darauf schließen lässt, dass der Boden aufgrund des Ereignisses vom Vortag noch eine deutliche Sättigung aufwies und/oder die Kanalisation noch nicht wieder vollständig entlastet war und es deshalb am Folgetag schneller zur Bildung von Oberflächenabfluss in dichter besiedelten Bereichen kam. Dies könnte die Entstehung der vielen Einsatzstellen trotz vergleichsweise geringer Niederschlagssummen erklären.

Wie zu erwarten, ergibt sich für die Siedlungsfaktoren eine signifikante, stark positive Korrelation. Angesichts des überwiegend flachen Reliefs und geringer Höhenunterschiede sind ausgewiesene Senken in Bad Doberan nicht vorhanden. Dementsprechend verteilen sich die Einsätze auf unterschiedliche Klassen des TPI und es ist auch keine signifikante Korrelation mit der Geländehöhe zu ermitteln.

Da für Bad Doberan kein Interview mit einem Mitarbeiter der Freiwilligen Feuerwehr zustande kam, liegen in diesem Fall keine Bewertungen hinsichtlich der Einflussfaktoren vor.



Abb. 65: Einsatz der Feuerwehr. (Quelle: pixabay/blickpixel).

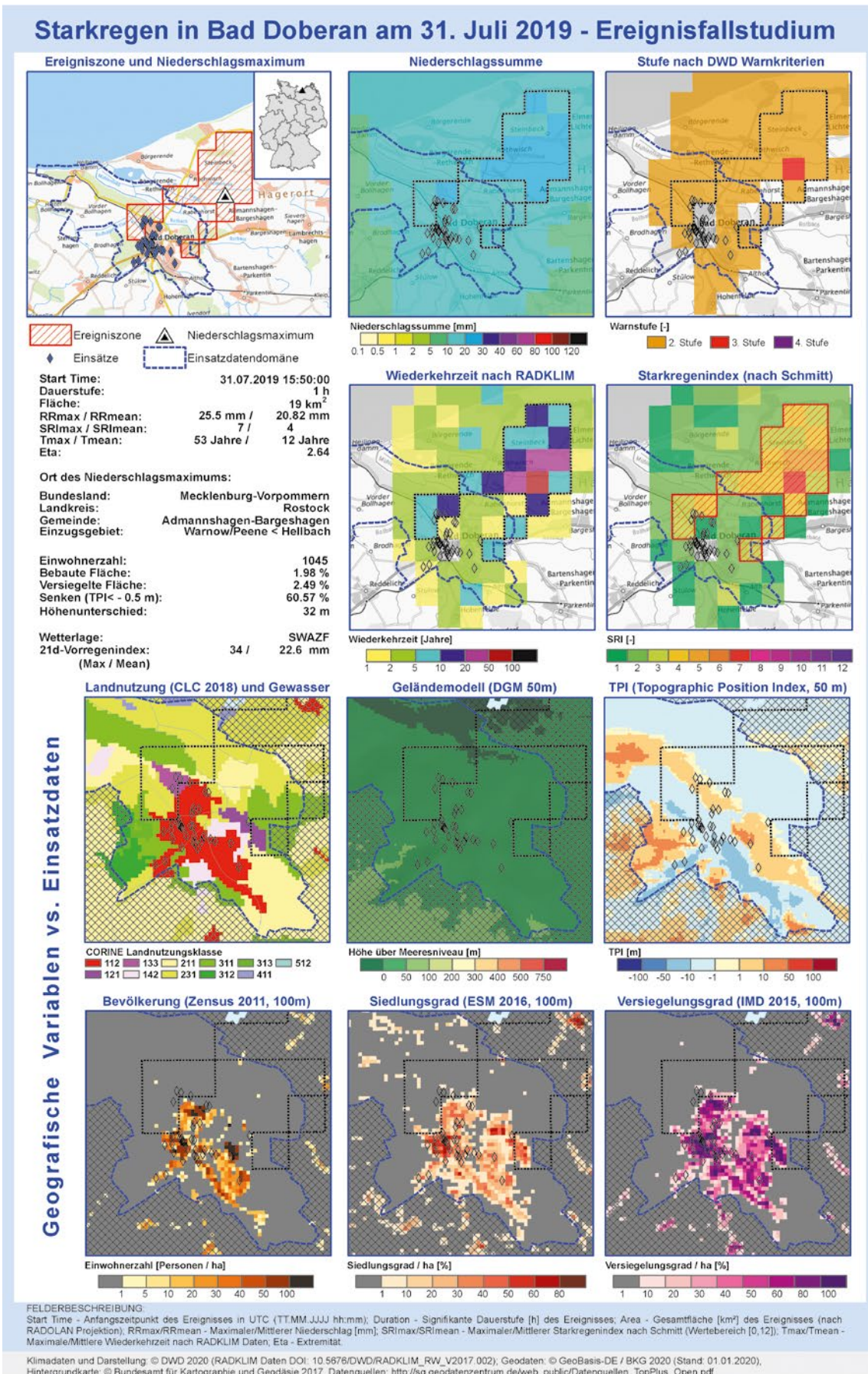


Abb. 66: Factsheet zum Ereignis vom 31. Juli 2019 in Bad Doberan.

7.3.3. Region Bamberg-Forchheim

Die kreisfreie Stadt Bamberg und seine südöstliche Umgebung bis zur großen Kreisstadt Forchheim liegen im Norden von Bayern und gehören dem bayerischen Regierungsbezirk Oberfranken an. Die Region beherbergt neben den beiden Städten viele kleinere Gemeinden und wird von der Regnitz durchflossen. Beide Städte liegen in einer hügeligen Tallandschaft, die nach Osten hin von der Fränkischen Schweiz umschlossen wird. In Bamberg leben aktuell rund 77.600 Einwohner (Stand 2019), in Forchheim 32.900 Menschen (Stand 2020) (STADT FORCHHEIM KDÖR o. J.).

Die Einsätze für Bamberg und Umgebung werden über die Integrierte Leitstelle Bamberg-Forchheim angenommen, verwaltet und an die Feuerwehren weitergeleitet. In diesen beiden Bereichen sind insgesamt 10 ehrenamtliche Feuerwehren und 70 aktive Kräfte im Hauptamt tätig. Die Kategorisierung der Einsätze ist aufgrund der bayerischen Alarmierungsbekanntmachung sehr detailliert. Dabei wird zuerst ein übergeordnetes

Stichwort (z. B. „Unwetter“) vergeben und die Lage im Anschluss mit einem Schlagwort (z. B. „Keller unter Wasser“) noch genauer beschrieben. Demnach war eine Zuordnung der Einsätze zu den Ereignissen recht zuverlässig möglich.

In den Jahren 2014 bis 2019 gab es in Bamberg und Umgebung 64 Starkregenereignisse (siehe Abbildung 67). 23 dieser Ereignisse hatten 1127 Einsätze der Feuerwehren zur Folge. Dazu zählen Niederschlagsereignisse mit jeweils über 100 Einsätzen im August 2014, Juli 2015 und Juni 2016. Das Jahr 2018 war mit 8 Starkregenereignissen, die insgesamt 562 Einsätze verursachten, besonders stark betroffen. Als Beispiel soll das Ereignis vom 5. Juli 2018 näher betrachtet werden. Aufgrund der Zuständigkeit des Interviewpartners von der Feuerwehr für die Gemeinden Heroldsbach und Hallersbach werden dabei vor allem Informationen aus diesem Einsatzbereich abgebildet. Darüber hinaus fließen Erfahrungen eines zweiten Interviewpartners, der in Leitungsfunktion bei der Leitstelle Bamberg-Forchheim tätig ist, in das Kapitel ein.

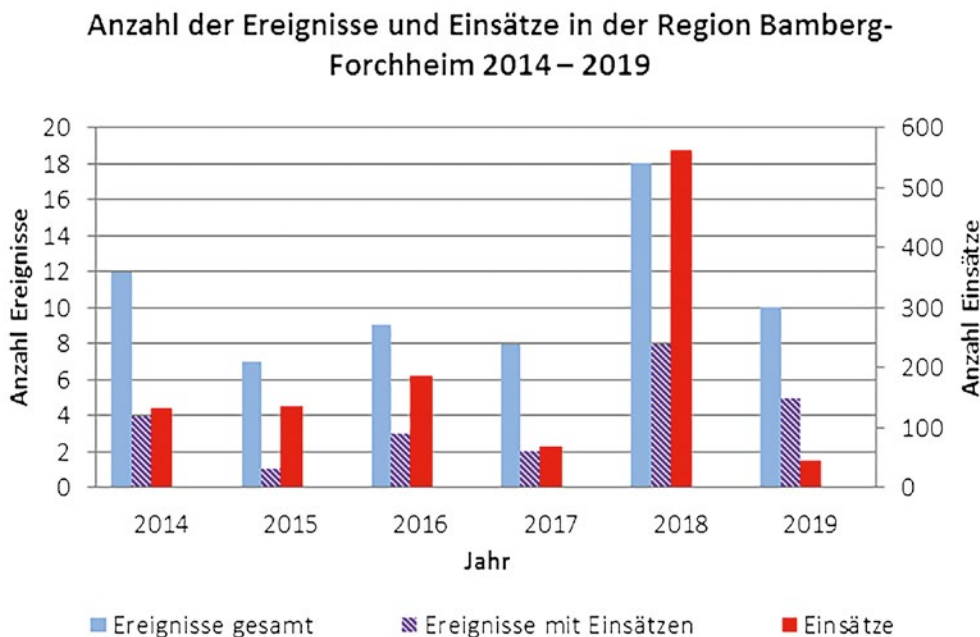


Abb. 67: Anzahl der Ereignisse und Einsätze in der Region Bamberg-Forchheim für die Jahre 2014 bis 2019. Die schraffierten Balken geben die Anzahl der Ereignisse aus der Gesamtzahl der das Gebiet schneidenden Ereignisse wieder, denen die Einsätze zugeordnet werden konnten.

7.3.3.1. Meteorologische Ereignisbeschreibung

Kräftige Hebung aufgrund eines Trog, der von Frankreich in Richtung Osten schwenkte, und eine feuchtwarme, labil geschichtete Luftmasse ermöglichten bereits am Morgen des 4. Juli 2018 im Süden die ersten Gewitter. Der Schwerpunkt der Gewittertätigkeit verlagerte sich am Nachmittag vom Westen stärker in Richtung Südosten. Am Abend war der Südosten mit Bayern und Thüringen am stärksten betroffen. In schwülwarmer Luft entwickelten sich bereits am Vortag Gewitter, die wegen ihrer langsamen Verlagerung Starkregen brachten. Am 5. Juli 2018 erstreckte sich der Schwerpunkt der Gewittertätigkeit in einem Bogen von der Eifel über das Rothaargebirge, Thüringen und Franken bis nach Niederbayern. Die Gewitter waren wieder vor allem mit Stark-

regen, teilweise auch mit größerem Hagel, verbunden. Der Starkregenindex für das Ereignis ist mit einem Wert von 8 bis 9 als hoch zu bewerten.

7.3.3.2. Schadensausmaß

In der Gemeinde Heroldsbach standen viele Straßen teilweise mehrere Zentimeter hoch unter Wasser und es wurden geparkte Autos durch die Wassermassen überschwemmt. Undichte Gastanks und umgestürzte Mauern stellten besondere Herausforderungen für die Einsatzkräfte dar. Der Bach hinter einem Gärtnergelände staute sich an einer Brücke auf und führte dort zu Überschwemmungen (INFRANKEN.DE 2018). Diese Stelle sei bereits während vergangener Starkregenereignissen problematisch und schadenbringend gewesen (Interview Bamberg).



Abb. 68: Überflutung und Pumparbeiten nach Starkregen in Heroldsbach (Quelle: Feuerwehr Heroldsbach-Thurn).

7.3.3.3. Einsatzgeschehen

Gegen 16 Uhr des 5. Juli 2018 ging die erste Einsatzmeldung bei der Leitstelle Bamberg-Forchheim ein, gefolgt von weiteren 212 Einsätzen. Der Zeitraum zwischen dem Einsetzen des Starkniederschlags gegen 15 Uhr und der ersten Alarmierung war dementsprechend kurz. In der zweiten und dritten Stunde nach der Erstalarmierung trat mit 80 bis 100 Einsätzen pro Stunde eine besonders starke Häufung auf. Erst nach der letzten

Alarmierung gegen 21:21 Uhr konnte die Feuerwehr zur Ruhe kommen.

Der Schwerpunkt der Einsatzfähigkeit lag in der Stadt Forchheim sowie in der südwestlich davon gelegenen Gemeinde Heroldsbach (siehe Abbildung 69). Vereinzelt traten auch in anderen Gemeinden Einsatzstellen auf. Dabei lagen alle Einsatzpunkte im unmittelbaren Bereich der Niederschlagszone.

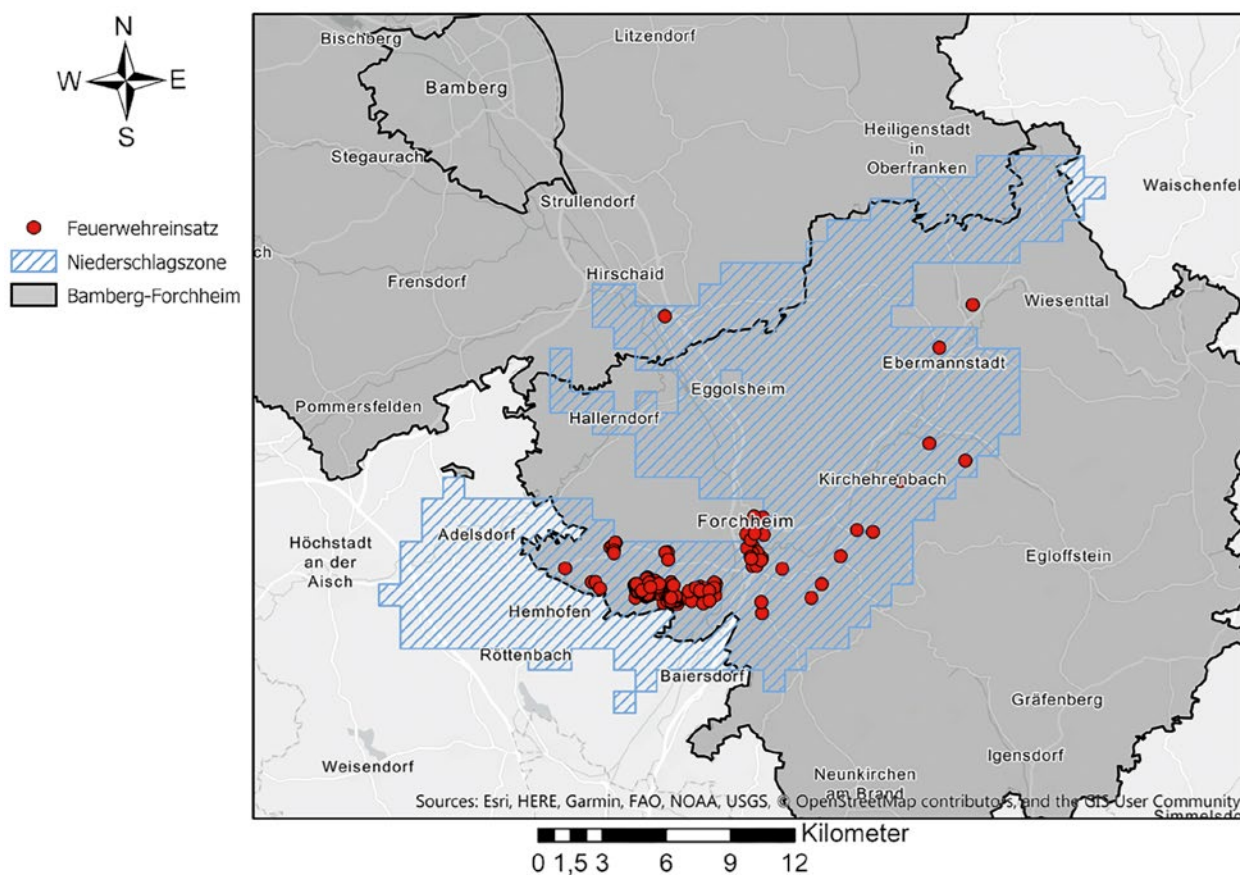


Abb. 69: Verteilung der Einsätze vom 05.07.2018 in der Region Bamberg-Forchheim (Quelle der Karte: GADM 2018).

Der Großteil der Einsätze (181) hatte eine Zeitdauer von weniger als einer Stunde und beschäftigte insgesamt 1046 Einsatzkräfte. Vereinzelt dauerten die Einsätze aber auch mehrere Stunden (max. 7 h) an und beschäftigten an manchen Stellen bis zu 25 Kräfte gleichzeitig bis in die späten Abendstunden. Aus der Berechnung der durchschnittlichen Anzahl an Einsatzkräften pro Einsatz für die verschiedenen Einsatzlängen wird deutlich, dass umso mehr Kräfte für die Einsatzbewältigung be-

nötigt wurden, je länger der Einsatz dauerte (siehe Abbildung 70). Dies könnte allerdings auch auf eine zwischenzeitliche Ablösung zurückzuführen sein, sodass vermutlich nicht alle Kräfte gleichzeitig aktiv waren. Auch das THW rückte noch am selben Tag kurz nach Beginn der enormen Einsatzhäufung (ab 17:50 Uhr) mit fast 70 Helfern zu Pumparbeiten und Sandsacktransport und verbau an.

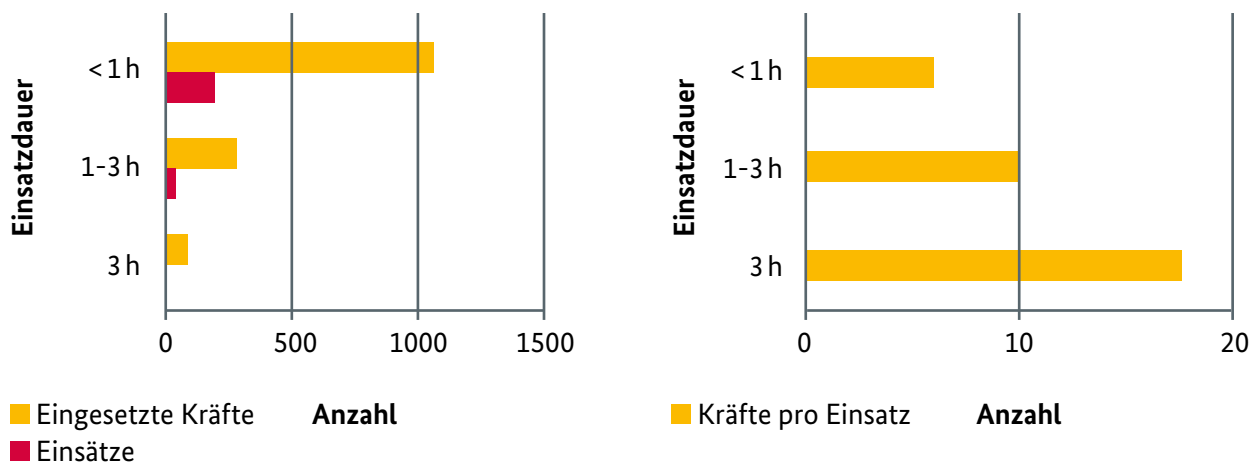


Abb. 70: Vergleich der Anzahl von Einsätzen und eingesetzten Kräften für verschiedene Einsatzdauern am Beispiel des Starkregenereignisses in der Region Bamberg-Forchheim am 05.07.2018. Zu sehen ist links die absolute Anzahl von Einsätzen und der dabei aktiven Einsatzkräfte und rechts das daraus errechnete Verhältnis für die jeweiligen Einsatzdauern.

Aufgrund der jahrelangen Erfahrungen mit vergangenen Ereignissen und der guten Zusammenarbeit wurde die Ereignisbewältigung sowohl durch die Leitstelle als auch die Feuerwehr als gut bewertet. Aufgrund getroffener Anpassungen nach Ereignissen der Vergangenheit konnte bei dem aktuellen Ereignis zum Beispiel auf eigens dafür bereitgestellte Räumlichkeiten zurückgegriffen werden, in denen alle relevanten Akteure von der Einsatzleitung über Vertreter der Feuerwehr, des THW und des Kreises bis zum Bürgermeister zusammenkommen konnten und „gemeinsam dieses Schadensereignis [bewältigten]“ (Interview Bamberg II). Verbesserungsbedarf wurde dagegen noch in der Übermittlung der Einsätze erkannt, die derzeit per Faxgerät geschieht und angesichts der Vielzahl der Meldungen zu einiger Sortierarbeit und Schwierigkeiten bei der Priorisierung geführt hat (Interview Bamberg I).

7.3.3.4. Analyse von Einflussfaktoren auf die Bildung von Einsatzschwerpunkten

a) Ergebnisse der Korrelationsrechnungen

Die Korrelationsanalyse zeigt einen moderaten signifikanten Zusammenhang zwischen dem Einsatzgeschehen und den meteorologischen Parametern für das Ereignis in der Region Bamberg-Forchheim (vgl. Tabelle 12). Viele der Einsätze fanden in einem gegenüber der Umgebung leicht abgesenkten Bereich oder an den Rändern von Erhebungen statt (vgl. Abbildung 71); eine aussagekräftige Korrelation ließ sich allerdings für den TPI und die Geländehöhe nicht nachweisen.

Die Korrelationen mit den Siedlungsattributen fallen im Gegensatz zu den übrigen Fallbeispielen mit $r = 0,25$ bis $r = 0,32$ deutlich geringer aus. Obwohl die Einsätze vor allem in der Landnutzungsklasse des urbanisierten Raumes liegen, könnte die geringe Korrelation damit zu begründen sein, dass ein weiträumiges Gebiet mit sehr unterschiedlichen Besiedlungsdichten betrachtet wurde.

Niederschlagsereignis		Region Bamberg-Forchheim (Landkreis)	
		05.07.2018 (D = 3 h, 14:50)	
URBANISIERUNG	Einwohnerzahl (Summe/1 km ²)	0,25	***
	Versiegelungsgrad (% , pro 1 km ²)	0,32	***
	Siedlungsgrad (% , pro 1 km ²)	0,30	***
TOPOGRAFIE	Geländehöhe (Median aus 1 km ²)	-0,12	*
	Topographic Position Index (Median aus 1 km ²)	-0,03	-
EREIGNIS-ATTRIBUTE 1. Ereignis	Niederschlagssumme über Ereignisdauer	0,21	***
	Starkregenindex nach Schmitt	0,15	**
	Warnstufe DWD (2/3/4)	0,21	***
	Wiederkehrzeit nach RADKLIM-Daten	0,08	-
	21-tägiger Vorregenindex	-0,08	-

Tab. 12: Korrelationsrechnungen für die Region Bamberg Forchheim
 Die rötliche Einfärbung steht für einen positiven, die bläuliche für einen negativen Zusammenhang. Je dunkler die Einfärbung, desto stärker der Zusammenhang. Die Signifikanz der Korrelation wird jeweils in der 2. Spalte abgebildet, wobei * p < 0,05 (95 %), ** p < 0,01 (99 %), *** p < 0,001 (99,9 %), - nicht signifikant (p > 0,05).

b) Ergebnisse der Bewertung durch die Interviewpartner

Da die Bewertung der Einflussfaktoren für das konkrete Ereignis schwierig von der Bewertung ihrer generellen Bedeutung zu trennen war, spiegeln die folgenden Ausführungen sowohl Besonderheiten des betrachteten Ereignisses als auch darüber hinausgehende Erfahrungen mit den jeweiligen Faktoren wider.

Vonseiten der beiden Interviewpartner wurde den meteorologischen Parametern der Niederschlagsmenge/-intensität ein starker bis sehr starker Einfluss auf die Herausbildung von Einsatzstellen beigemessen (siehe Abbildung 72). Auch den physisch-geografischen Faktoren wie

der Geländeform und den Bodeneigenschaften sowie resultierend der Bildung von Oberflächenabfluss kommt ihrer Einschätzung nach ein hoher bis sehr hoher Einfluss zu. Aus der Erfahrung mit hochgedrückten Gullydeckeln (Interview Bamberg I) wurde die Kanalnetzkapazität ebenfalls mit einem starken bis sehr starken Einfluss bewertet. Die Besiedlungsdichte und die Bebauungsstruktur bewegen sich laut Beurteilung auf einem mittleren Einflussniveau.

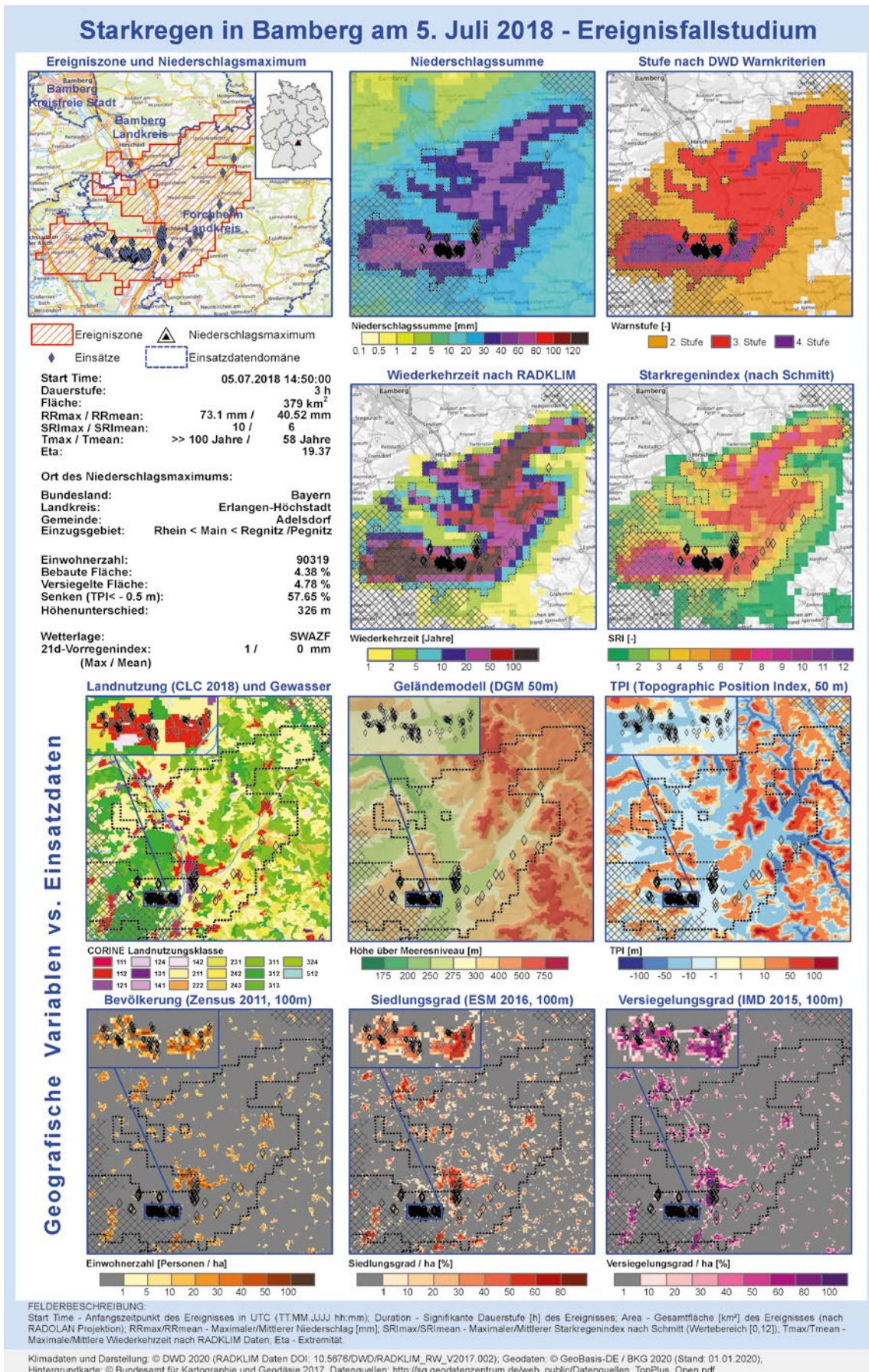


Abb. 71: Factsheet zum Ereignis vom 5. Juli 2018 in Bamberg.

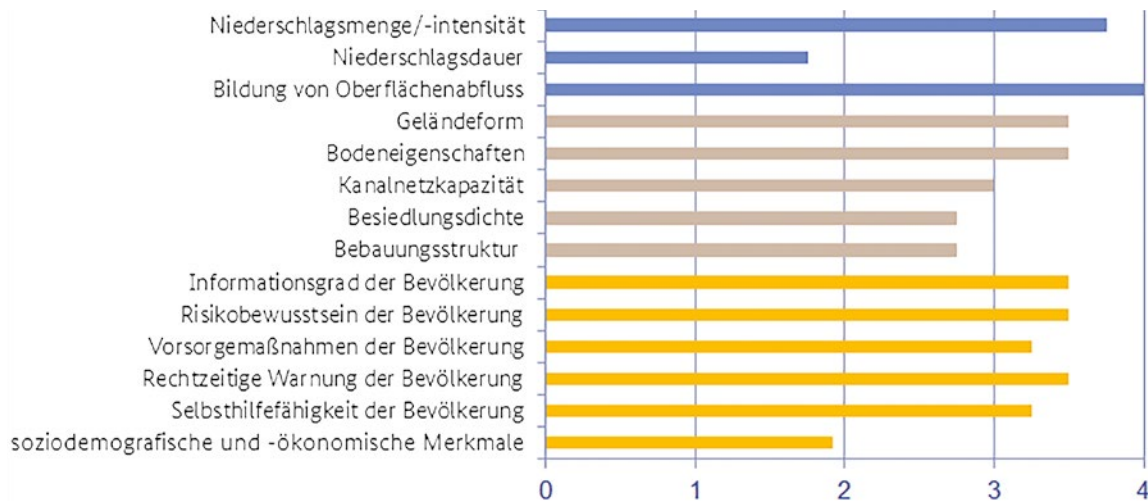


Abb. 72: Beurteilung von Einflussfaktoren auf die Herausbildung von Einsatzstellen bei Starkregen aus Sicht der beiden Interviewpartner in der Region Bamberg–Forchheim. Der Wert 0 steht für keinen Einfluss, 4 für einen sehr starken Einfluss. Die Bewertungen der beiden Interviewpartner wurden für die Abbildung gemittelt.

Hinsichtlich der Bevölkerungsfaktoren waren beide Interviewpartner der Ansicht, dass der Informationsgrad, das Risikobewusstsein und die Vorsorgemaßnahmen der Bevölkerung, aber auch ihre rechtzeitige Warnung und ihre Selbsthilfefähigkeit einen starken bis sehr starken Einfluss auf die Entstehung von Einsatzstellen haben. Bezüglich soziodemografischer und sozioökonomischer Merkmale schwankte die Bewertung um einen mittelhohen Bereich und wurde nochmals nach einzelnen, dahinterstehenden Merkmalen differenziert. Beispielsweise wurde dem Alter ein höherer Einfluss beigemessen als dem Bildungsgrad, da sich die körperliche Verfassung sehr wohl auf die Selbsthilfefähigkeit auswirke, wohingegen eine höhere Bildung dafür kein Garant sei. Auch eine Abhängigkeit von der Einkommenshöhe wurde eher verneint, da auch in geringeren Einkommenschichten mit viel Einfallsreichtum zum Teil gute Anpassungslösungen gefunden würden (Interview Bamberg I).

7.3.4. Köln

Köln ist mit über 1 Million Einwohnern auf einer Fläche von 404,9 km² (STADT KÖLN 2020) die bevölkerungsreichste Stadt in Nordrhein-Westfalen. Die Stadt liegt am Rhein in der Kölner Bucht und wird vom Bergischen Land und der Eifel umgeben. Die Feuerwehr der Stadt besteht aus 1.249 hauptberuflichen Kräften an elf Standorten sowie 821 freiwilligen Kräften, die sich auf 29 Standorte verteilen. Die Feuerwehr- und Rettungsleitstelle Köln ist für den gesamten Stadtbezirk zuständig.

Den Einsätzen in der zur Verfügung gestellten Datenbank wurde je ein Stichwort (z. B. WASSER) und ein Abschlussstichwort (z. B. WASSER1) zugewiesen. Die Auswertung ergab, dass die Daten auch viele Einsätze enthielten, die in keiner Verbindung zu einem Unwetterereignis standen. Die exakte Ortsangabe über GPS-Koordinaten ermöglichte dennoch eine Reihe detaillierter Analysen.

In den Jahren 2013 bis 2019 gab es über dem Kölner Stadtgebiet 23 Starkregenereignisse. 10 dieser Ereignisse hatten insgesamt 892 Einsätze der Feuerwehren zur Folge (siehe Abbildung 73). Besonders betroffen waren die Jahre 2014 mit 10 Ereignissen, von denen 3 Ereignisse 243 Einsätze auslösten, sowie 2017, in dem es 2 verheerende Ereignisse mit insgesamt 336 Einsätzen gab. Im Folgenden wird aus dieser Reihe das „Doppelerignis“ vom 19. und 20.07.2017 näher beschrieben.

7.3.4.1. Meteorologische Ereignisbeschreibung

Deutschland lag am 18. Juli 2017 zunächst unter einem Höhenkeil, dem ein auf die Biskaya und die Iberische Halbinsel übergreifender Trog folgte. Im Bereich des Keils sorgte zunächst ein Absinken für eine nahezu ungehinderte Einstrahlung und damit eine Aufheizung der Luftmasse auf Temperaturen deutlich über 30 bis 35 °C. Trogvorderseitig bildete sich eine flache Tiefdruckrinne heraus, an deren Südflanke zusehends feuchtere und labil geschich-

tete Luft eingesteuert wurde. Lediglich der Norden und Nordosten Deutschlands wurden von dieser Luftmasse noch nicht erfasst. In der feuchtwarmen Luft entstand ein hohes energetisches Potenzial für Konvektion. Zudem wurde mit der Tiefdruckrinne sehr feuchte Luft eingesteuert, wodurch der Gehalt an niederschlagbarem Wasser (vorhandenes H₂O in der Wassersäule) auf 30 bis über 40 mm stieg. Mit dem Schwenken der Keilachse in der Nacht zum 19.07.2017 wurden mit südwestlicher Strömung kurzweilige Keil-Trog-Strukturen nordostwärts geführt, wodurch im Westen und später im Norden Hebung und zumindest niedertroposphärisch dann auch Scherung aufkamen. Somit waren die Voraussetzungen für eine ausgewachsene Schwerkümmertage gegeben. Die Folgen waren Gewitter, schwere Sturmböen, heftiger Starkregen bis 49 mm/Stunde (Köln-Stammheim) und größerer Hagel. Am 20.07.2017 entwickelten sich innerhalb einer potenziell instabilen Luftmasse in weiten Teilen Deutschlands wiederum Schauer und teils kräftige Gewitter.

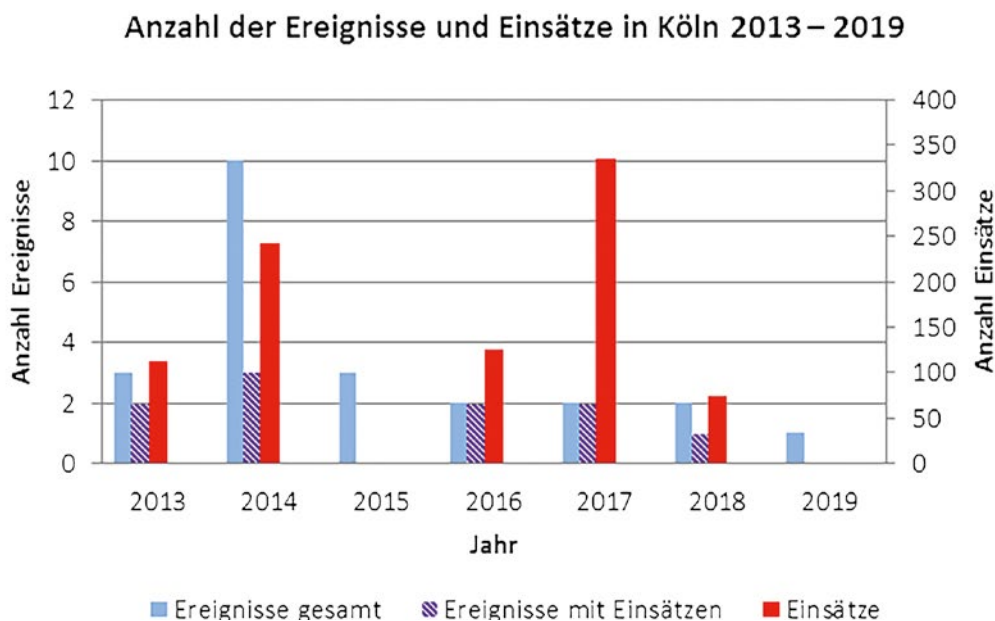


Abb. 73: Anzahl der Ereignisse und Einsätze in Köln für die Jahre 2013 – 2019. Die schraffierten Balken geben die Anzahl der Ereignisse aus der Gesamtzahl der das Gebiet schneidenden Ereignisse wieder, denen die Einsätze zugeordnet werden konnten.

7.3.4.2. Schadensausmaß

In Nordrhein-Westfalen, Hessen und Niedersachsen traten Unwetterschäden durch Starkregen, Sturmböen und Blitzschläge auf.

In Köln wurde neben überfluteten Straßen, Tunneln und einer U-Bahn-Haltestelle auch eine Parkgarage von den heftigen Regenfällen überschwemmt. Der Flugverkehr am Flughafen

Köln/Bonn musste zweifach unterbrochen werden (STADT KÖLN 2017).

7.3.4.3. Einsatzgeschehen

Der erste Einsatz des Doppelerignisses ereignete sich kurz nach Beginn des Starkregens am 19.07.2017 gegen 15:30 Uhr. Insgesamt waren zu diesem Ereignis 290 Einsatzeinträge in der Einsatzdatenbank vorhanden, die Stadt Köln berichtete sogar von rund 430 Einsatzkräften der Berufs- und Freiwilligen Feuerwehr (STADT KÖLN 2017). Allein in der ersten Stunde musste die Feuerwehr 87 Mal ausrücken, auch in der zweiten und dritten Stunde waren noch 60 bis 70 Einsätze, in der vierten Stunde knapp 40 Einsätze zu bewältigen. Die letzte Einsatzmeldung erreichte die Feuerwehr um 2 Uhr nachts. Somit war die Kölner Feuerwehr mehr als 10 Stunden im Dauereinsatz. Vom Führungsstab wurde aufgrund der Vielzahl an Notrufmeldungen ein sogenannter „Sonderalarm“ ausgerufen, die Leitstelle konnte die Alarmierung und Disposition in ihrer zentralen Funktion allein kaum bewältigen (Interview Köln). Am Abend des 19.07.2017 wurde auch das THW zur Hilfe gerufen. Mit Einsetzen eines

zweiten, wenn auch schwächeren Starkregenereignisses gegen 4 Uhr des 20.07.2017 musste die Feuerwehr ab 6 Uhr erneut zu insgesamt 46 Einsätzen ausrücken. Wenn auch diesmal weniger Einsätze pro Stunde auftraten, war die Feuerwehr wiederum fast 14 Stunden beschäftigt, bis die letzte Einsatzalarmierung gegen 19:45 Uhr eintraf.

Aus Abbildung 74 wird deutlich, dass der Westen Kölns und die innenstadtnahen Bereiche an beiden Ereignistagen besonders stark betroffen waren (STADT KÖLN 2017). Dabei trat vor allem eine Häufung von Einsätzen in den Stadtteilen Nippes und Bickendorf auf.

Besondere Herausforderungen bei der Ereignisbewältigung wie die Eigenbetroffenheit von Feuerwachen oder Einsatzkräften traten nach Angabe des Interviewpartners nur in Einzelfällen auf. Aufgrund der breiten personellen und materiellen Ausstattung sei die Feuerwehr Köln auf das Ereignis insgesamt gut vorbereitet gewesen. Auch die Zusammenarbeit mit allen Ämtern der Stadt wurde lobend hervorgehoben.

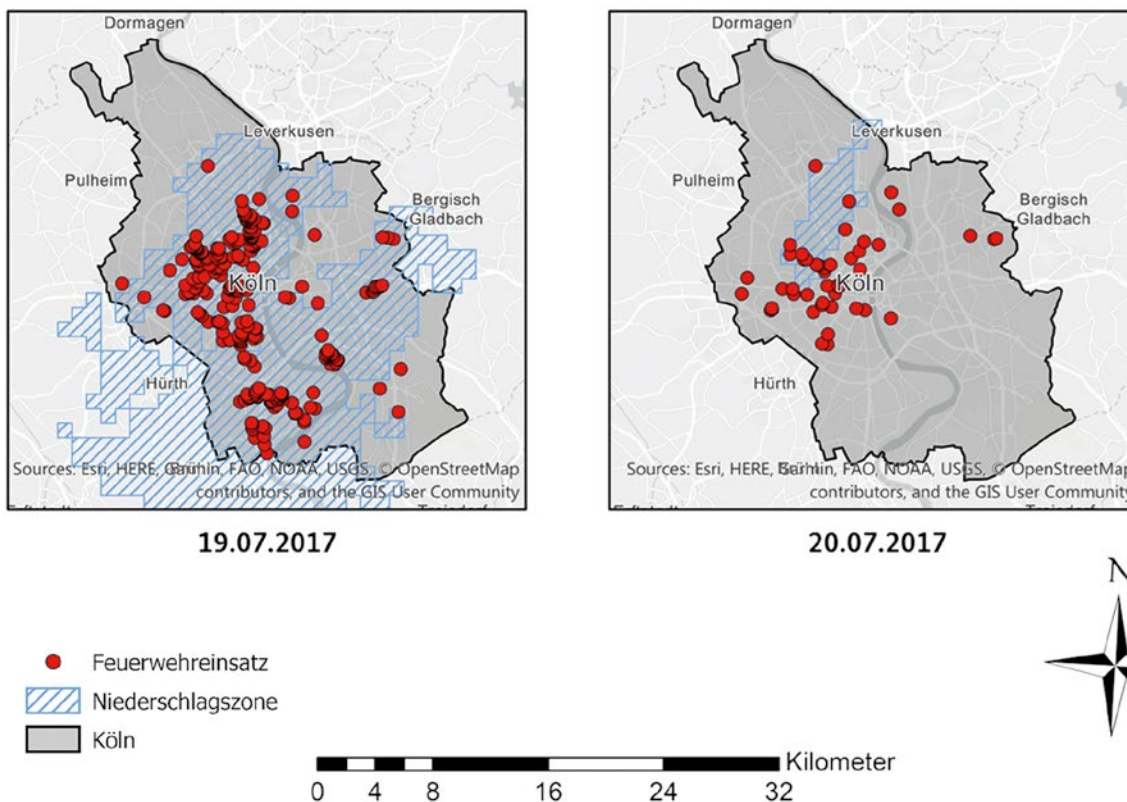


Abb. 74: Verteilung der Einsätze am 19. und 20.07.2017 in Köln (Quelle der Karte: GADM 2018).

		Köln		
1. Niederschlagsereignis		19.07.2017 (D = 2 h, 12:50)		
2. Niederschlagsereignis		20.07.2017 (D = 2h, 03:50)		
URBANISIERUNG	Einwohnerzahl (Summe/1 km ²)	0,44	***	
	Versiegelungsgrad (% , pro 1 km ²)	0,37	***	
	Siedlungsgrad (% , pro 1 km ²)	0,39	***	
TOPOGRAFIE	Geländehöhe (Median aus 1 km ²)	-0,04	-	
	Topographic Position Index (Median aus 1 km ²)	0,05	-	
EREIGNIS-ATTRIBUTE	Niederschlagssumme über Ereignisdauer	0,32	***	
	Starkregenindex nach Schmitt	0,29	***	
1. Ereignis	Warnstufe DWD (2/3/4)	0,27	***	
	Wiederkehrzeit nach RADKLIM-Daten	0,13	**	
	21-tägiger Vorregenindex	0,01	-	
	2. Ereignis	Niederschlagssumme über Ereignisdauer	0,20	***
		Starkregenindex nach Schmitt	0,15	**
Warnstufe DWD (2/3/4)		0,12	*	
Wiederkehrzeit nach RADKLIM-Daten		0,17	***	
21-tägiger Vorregenindex		0,35	***	

Tab. 13: Korrelationsrechnungen für Köln

Die rötliche Einfärbung steht für einen positiven, die bläuliche für einen negativen Zusammenhang. Je dunkler die Einfärbung, desto stärker der Zusammenhang. Die Signifikanz der Korrelation wird jeweils in der 2. Spalte abgebildet, wobei * p < 0,05 (95 %), ** p < 0,01 (99 %), *** p < 0,001 (99,9 %), - nicht signifikant.

7.3.4.4. Analyse von Einflussfaktoren auf die Bildung von Einsatzschwerpunkten

a) Ergebnisse der Korrelationsrechnungen

Die Korrelationsanalyse zeigt ausschließlich positive signifikante Zusammenhänge zwischen der Zahl der Einsätze und den meteorologischen Parametern für beide Ereignistage (vgl. Tabelle 13). Der hohe Zusammenhang lässt sich auch aus Abbildung 75 erkennen, wonach sich am 1. Ereignistag nahezu alle Einsatzdatenpunkte im Bereich der höchsten Niederschlagssummen und DWD-Warnstufen befinden. Neben der Niederschlagssumme tritt für den 2. Ereignistag auch der Vorregenindex mit einer hohen Korrelation hervor, der sich mit der hohen Wassersättigung des

Bodens und einem unvollständigen Regenwasserablauf in der Kanalisation durch das Ereignis des Vortages erklären lässt. Aufgrund dessen ist zu vermuten, dass es am zweiten Ereignistag deutlich schneller zur Bildung von Oberflächenabfluss mit entsprechenden Schadens- oder Gefahrenstellen kam, obwohl die Niederschlagssummen hierbei deutlich geringer ausfielen als am Vortag (vgl. Abbildung 76): eine aussagekräftige Korrelation ließ sich allerdings für den TPI und die Geländehöhe nicht nachweisen.

Hinsichtlich der Siedlungsfaktoren Versiegelungsgrad, Einwohnerzahl und Siedlungsgrad besteht ein mittlerer signifikanter Zusammenhang, der mit $r = 0,37$ bis $r = 0,43$ etwas geringer

ausfällt als in den meisten übrigen Fallstudiengebieten. Mit Blick auf das Geländemodell und den Topographic Position Index (TPI) lässt sich keine eindeutige Tendenz erkennen, da sich die Einsätze sowohl in Senken als auch im Bereich von Erhebungen verorten lassen. Aus den Korrelationen der Einsätze mit dem TPI und der Geländehöhe lässt sich demzufolge auch keinerlei Zusammenhang ableiten. Die Einsatzschwerpunkte scheinen in diesem Fallbeispiel somit eher durch die hohen Niederschlagssummen vor Ort zustande gekommen zu sein als durch eine „Verschiebung“ der Wassermassen durch den Abfluss in Senken, wie es in anderen Fallbeispielen (z. B. Potsdam) der Fall war.

b) Ergebnisse der Bewertung durch den Interviewpartner

Eine Bewertung der Einflussfaktoren hat im Fallbeispiel Köln nicht stattgefunden, es wurden jedoch unabhängig davon einige Anmerkungen dazu gemacht. Die folgenden Ausführungen spiegeln dabei sowohl Besonderheiten des betrachteten Ereignisses als auch darüber hinausgehende Erfahrungen mit den jeweiligen Faktoren wider.

Neben dem Niederschlag selbst wurde auch der zeitgleich auftretende starke Wind als ausschlaggebend für manche Überflutung genannt, da der dadurch anfallende Laubabfall zum Teil die Zuläufe der Kanalisation verstopft habe. Generell spielt nach Einschätzung des Interviewpartners die Selbsthilfefähigkeit der Bürgerinnen und Bürger eine große Rolle für die Anzahl der Einsätze. Dabei hätten insbesondere das Alter und der Siedlungshintergrund – „vom Land zugezogen oder schon immer Stadtkind“ – eine nicht näher ausgeführte Bedeutung. In den Randgebieten der Stadt sei die Selbsthilfefähigkeit der Erfahrung nach höher ausgeprägt, da die dort lebende Bevölkerung zum einen besser ausgestattet sei, zum anderen hier aber auch eine stärker ausgeprägte Bereitschaft zur Selbsthilfe zu beobachten sei. Vorsorge- und Selbstschutzmaßnahmen werden eher im Zusammenhang mit Flusshochwasser als bedeutsam erachtet.

Abschließend sei an dieser Stelle noch ein kurzer Blick auf die von den Stadtentwässerungsbetrieben (StEB) Köln entwickelte und für die Projektauswertung zur Verfügung gestellte Starkregengefahrenkarte geworfen. Diese ist frei über die Internetseite der StEB zugänglich und erlaubt über eine vierstufige Skala die Einschätzung der Starkregengefährdung auf Stadtteil-ebene bis hin zu einzelnen Straßen. Beispielhaft wurden die Einsatzdatenpunkte für das Ereignis des 19./20.07.2017 mit der Karte verschnitten und in Abbildung 77 dargelegt. Ein Zusammenhang zwischen den Einsatzpunkten und Bereichen mit erhöhtem Starkregenisiko ist bei starker Vergrößerung für einzelne Einsatzdatenpunkte erkennbar. Insofern scheint der Abgleich von Einsatzschwerpunkten mit den durch die Starkregenisikoberechnung identifizierten Gefahrenzonen grundsätzlich für eine Validierung von Starkregengefahrenkarten geeignet.

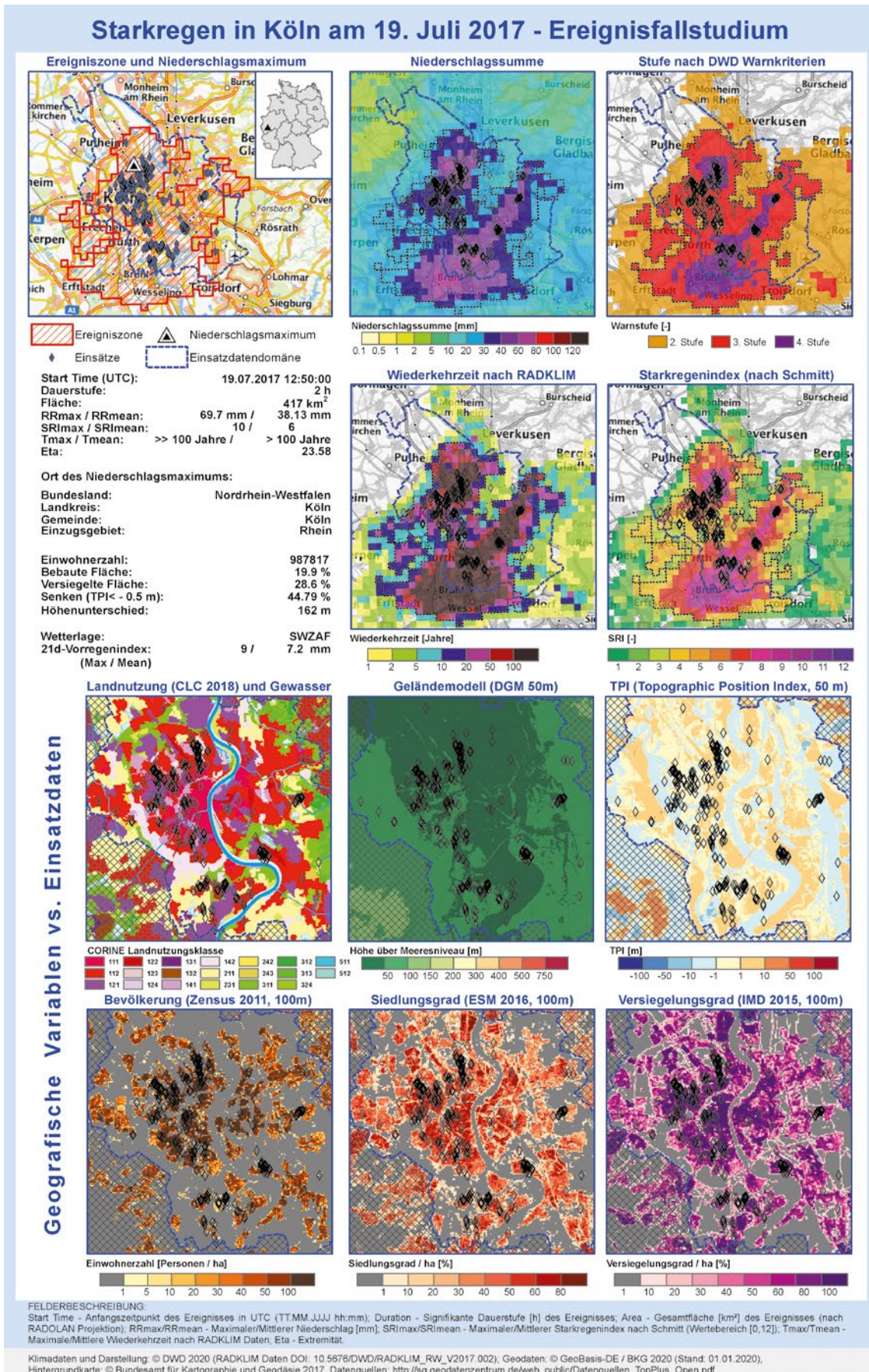


Abb. 75: Factsheet zum Ereignis vom 19. Juli 2017 in Köln.

Starkregen in Köln am 20. Juli 2017 - Ereignisfallstudium

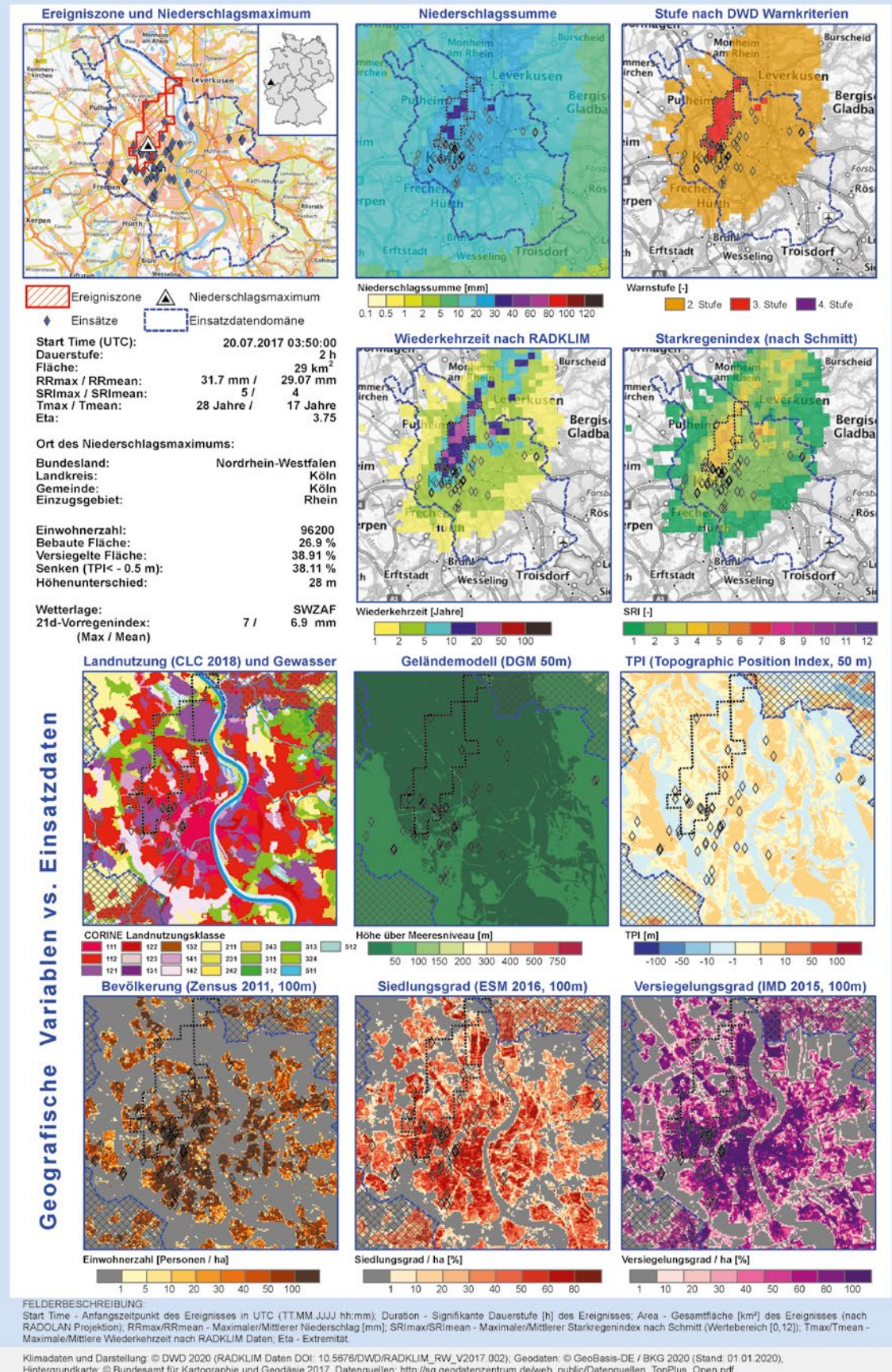


Abb. 76: Factsheet zum Ereignis vom 20. Juli 2017 in Köln.

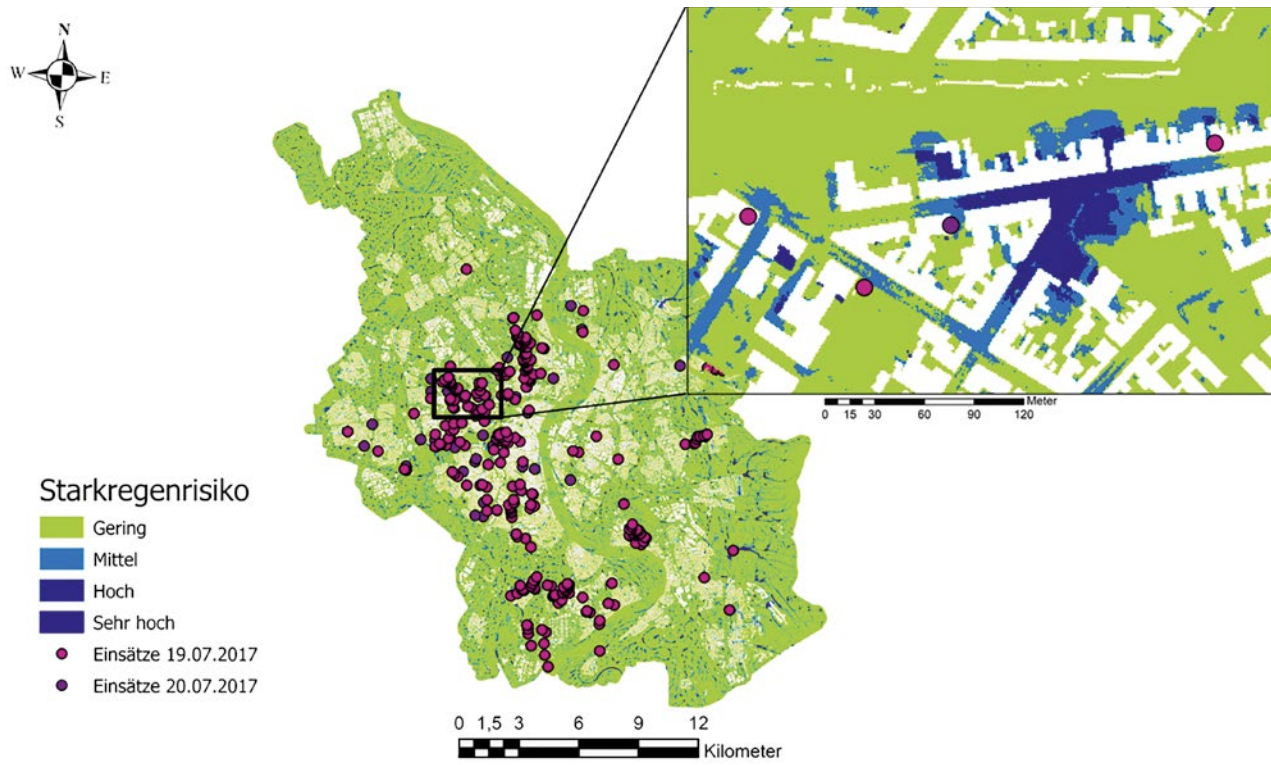


Abb. 77: Starkregengefahrenkarte für Köln mit den Einsätzen des Doppelereignisses 19./20.07.2017 (Quelle der Karte: StEB Köln 2020).

7.3.5. Nordwalde

Nordwalde befindet sich im Münsterland nordwestlich von Münster und südöstlich der Stadt Steinfurt. In der ländlichen Kommune leben rund 9.800 Menschen auf einer Fläche von 54 km² (SCHRÖER 2021). Umliegend der Gemeinde treten einige kleinere Erhebungen auf, die Höhenunterschiede von 50 m innerorts und 80 m außerhalb des Ortes bedingen (ebd.). Mehrere Bachläufe durchqueren den Ortskern und münden danach in einem einzigen Bachlauf, der das Wasser in Richtung der naheliegenden Kommune Emsdetten abführt.

Die ortsansässige Freiwillige Feuerwehr verfügt über rund 100 aktive Mitglieder, darunter auch

einige hauptamtliche Kräfte. Die Feuerwehr ist dem Leitstellenbereich Kreis Steinfurt mit Sitz in Rheine angegliedert. Für die Analyse wurden bereits nach Starkregenereignissen vorausgewählte Einsatzdaten zur Verfügung gestellt.

Für die Jahre 2010 bis 2014 listet der Ereigniskatalog für Nordwalde 9 Starkregenereignisse. Für 2 dieser Ereignisse wurden Einsatzdaten zur Verfügung gestellt, die insgesamt 304 Einsätze zur Folge hatten (siehe Abbildung 78): Im Jahr 2010 wurden durch ein verheerendes Starkregenereignis rund 250 Einsätze ausgelöst, 4 Jahre später traten 54 Einsätze infolge eines Ereignisses auf. Im Folgenden wird das Ereignis vom 26. bis 28.08.2010 näher betrachtet.

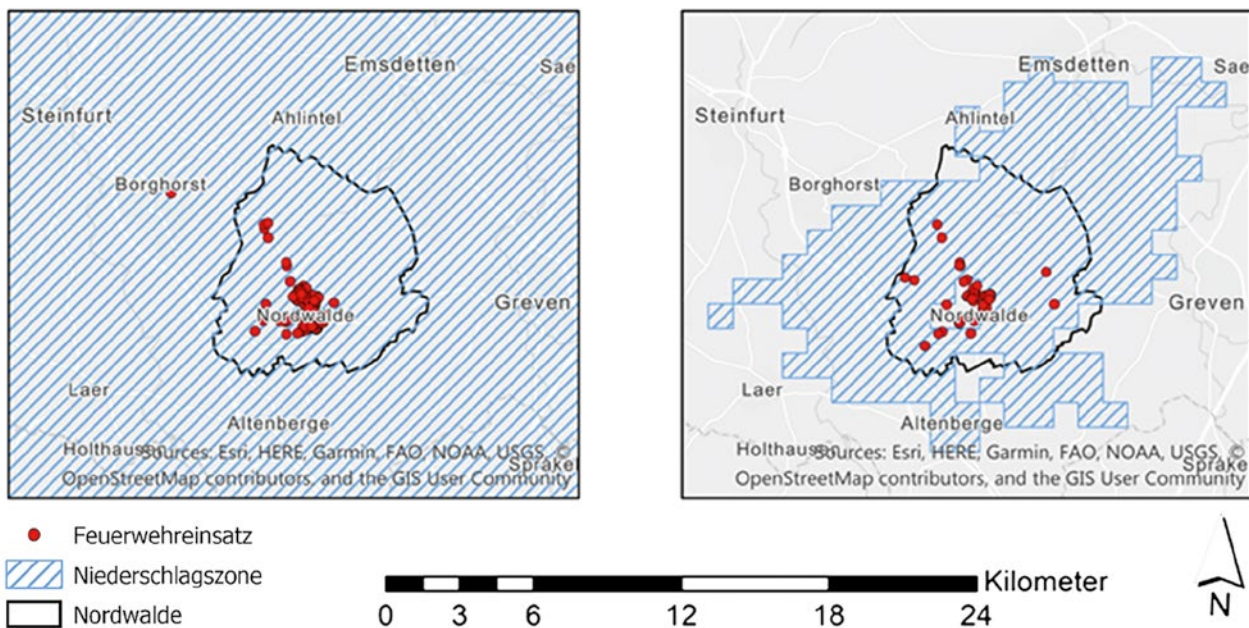


Abb. 78: Verteilung der Einsätze auf die Ereignisse in den Jahren 2010 und 2014 in der Gemeinde Nordwalde (Quelle der Karte: GADM 2018).

7.3.5.1. Meteorologische Ereignisbeschreibung

Im Vorfeld der Warmfront eines westlich des Ärmelkanals gelegenen Tiefs setzte in der zweiten Tageshälfte des 25.08.2010 starke Warmluftadvektion ein, die zu skaligen Regenfällen führte, die am Abend auf den Westen Nordrhein-Westfalens übergriffen und sich ostwärts ausdehnten. Am 26.08.2010 kam es zu weiteren Niederschlägen, die im Bereich einer quasistationären Tiefdruckrinne ostwärts zogen. Durch die an den Hebungsprozessen beteiligte feuchtwarme Luftmasse kam es zu konvektiven Verstärkungen mit hohen stündlichen Niederschlagsintensitäten. Die ergiebigen, teils konvektiv verstärkten Dauerregen führten in einem schmalen Streifen, der sich von den Niederlanden über das nördliche Münsterland und das Osnabrücker Land bis westlich von Hannover erstreckte, verbreitet zu Niederschlagswerten oberhalb 100 mm pro Tag und lösten starke Überschwemmungen aus.



Abb. 79: Einsatzarbeiten der Feuerwehr Nordwalde am überfluteten Pumpwerk Denkerstiege nach Starkregen im August 2010 (Quelle: Feuerwehr Nordwalde 2018).

7.3.5.2. Schadensausmaß

Aufgrund des Ereignisses waren nicht nur Privathaushalte betroffen, sondern auch mehrere Einrichtungen kritischer Infrastruktur, bspw. das Pumpwerk einer Kläranlage (Abbildung 79), verschiedene Schulgebäude sowie ein Alten- und Pflegezentrum (Stromausfall); mehrere Zufahrtsstraßen mussten aufgrund von Überflutung gesperrt werden (vgl. Abbildung 80; SCHRÖER 2021).

7.3.5.3. Einsatzgeschehen

Aufgrund einer entsprechenden Wetterwarnung wurden bereits im Vorfeld des Ereignisses die ersten Vorbereitungen getroffen. Die eigentliche Einsatzfähigkeit für die Feuerwehr Nordwalde begann gegen 19 Uhr. Insgesamt zog sich die Bewältigung von über 350 Einsatzstellen über einen Zeitraum von rund 43 Stunden. Etwa 100 dieser Einsätze konnten ohne aktive Unterstützung der Feuerwehr im Rahmen der Nachbarschaftshilfe abgearbeitet werden.



Abb. 80: Überflutete Zufahrt in der Bauernschaft Scheddebrock nach Starkregen im August 2010 (Quelle: Feuerwehr Nordwalde).

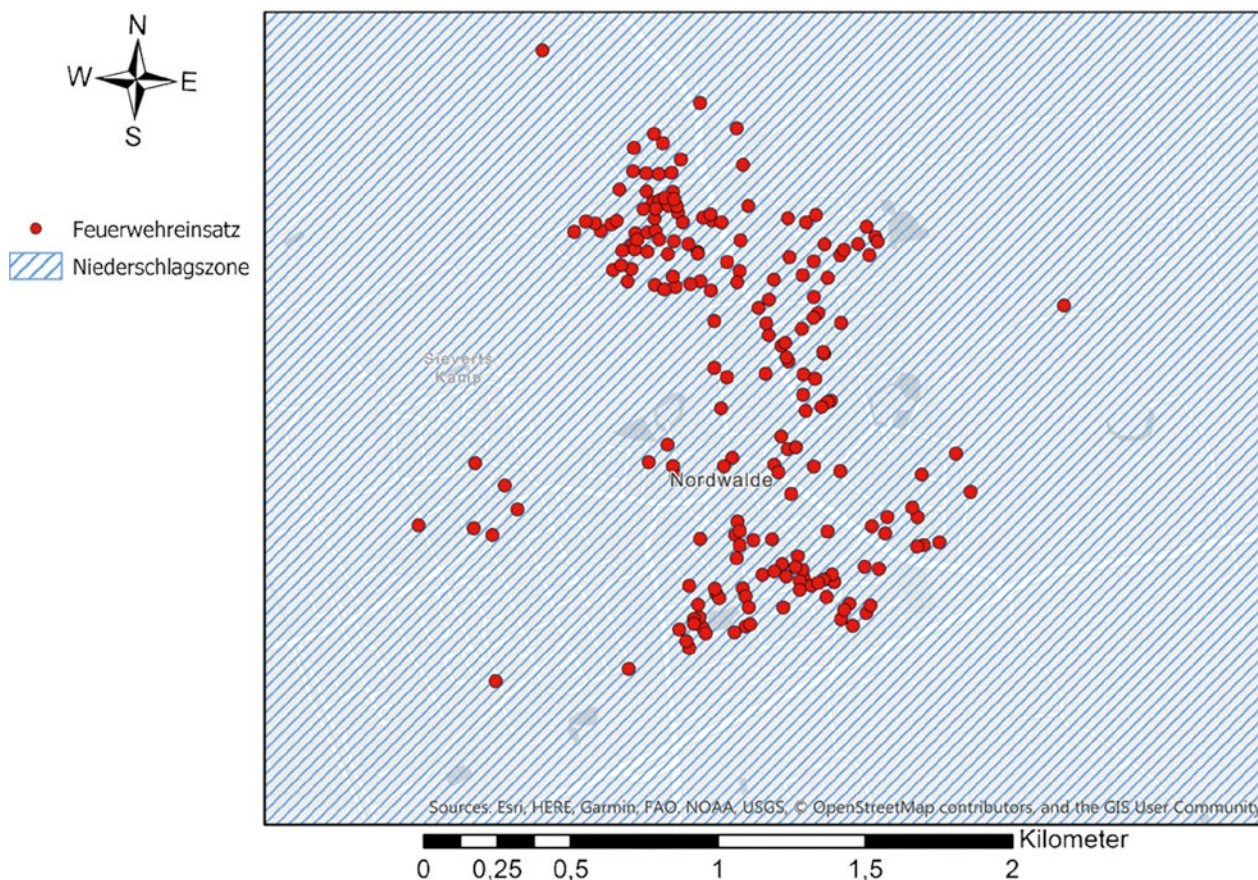


Abb. 81: Verteilung der Einsätze vom 26.-28.08.2010 in Nordwalde und Umgebung.

Die Einsätze verteilten sich dabei nahezu über das gesamte Gemeindegebiet von Nordwalde, mit Schwerpunkten im Norden und im Süden des Ortes (siehe Abbildung 81). Aufgrund der großräumigen Niederschlagszone konnte keine überörtliche Hilfe aus den Nachbargemeinden angefordert werden. Das THW war jedoch mit 7 Einsätzen und bis zu 26 Helfern an einer Einsatzstelle an der Ereignisbewältigung beteiligt. Insgesamt sah sich die Feuerwehr trotz „Erfahrung mit Unwetterlagen jeglicher Art“ kaum in der Lage, die Menge an Einsätzen zu bewältigen (SCHRÖER 2021).

7.3.5.4. Analyse von Einflussfaktoren auf die Bildung von Einsatzschwerpunkten

a) Ergebnisse der Korrelationsrechnungen

Die Korrelationsrechnung lässt erkennen, dass zwischen den meteorologischen Parametern und den Einsätzen für das Ereignis nur ein geringer, nicht signifikanter Zusammenhang besteht (vgl. Tabelle 14). Eine mittlere negativ signifikante Korrelation bestätigt dagegen den Einfluss der Topografie auf die Herausbildung von Einsatzstellen. Dies ist auch in Abbildung 82 zu erkennen, wonach sich die meisten Einsatzpunkte in Senkenlage befanden. In Bezug auf die Siedlungsfaktoren zeigt das Ergebnis der Korrelationsrechnung besonders für die Einwohnerzahl, aber auch für den Versiegelungs- und Siedlungsgrad einen sehr hohen signifikanten Zusammenhang zum Einsatzgeschehen am Tag des Ereignisses.

Niederschlagsereignis		Nordwalde	
		26.08.2010 (D = 24 h, 04:50)	
URBANISIERUNG	Einwohnerzahl (Summe/1 km ²)	0,74	***
	Versiegelungsgrad (% pro 1 km ²)	0,63	***
	Siedlungsgrad (% pro 1 km ²)	0,65	***
TOPOGRAFIE	Geländehöhe (Median aus 1 km ²)	-0,04	-
	Topographic Position Index (Median aus 1 km ²)	-0,38	**
EREIGNIS- ATTRIBUTE 1. Ereignis	Niederschlagssumme über Ereignisdauer	-0,10	-
	Starkregenindex nach Schmitt	-0,02	-
	Warnstufe DWD (2/3/4)		
	Wiederkehrzeit nach RADKLIM-Daten	-0,16	-
	21-tägiger Vorregenindex	-0,07	-

Tab. 14: Korrelationsrechnungen für Nordwalde

Die rötliche Einfärbung steht für einen positiven, die bläuliche für einen negativen Zusammenhang. Je dunkler die Einfärbung, desto stärker der Zusammenhang. Die Signifikanz der Korrelation wird jeweils in der 2. Spalte abgebildet, wobei * $p < 0,05$ (95 %), ** $p < 0,01$ (99 %), *** $p < 0,001$ (99,9 %), - nicht signifikant.

b) Ergebnisse der Bewertung durch den Interviewpartner

Da die Bewertung der Einflussfaktoren für das konkrete Ereignis schwierig von der Bewertung ihrer generellen Bedeutung zu trennen war, spiegeln die folgenden Ausführungen sowohl Besonderheiten des betrachteten Ereignisses als auch darüber hinausgehende Erfahrungen mit den jeweiligen Faktoren wider.

Nach Einschätzung des Interviewpartners aus Nordwalde hat die Niederschlagsmenge/ intensität im Allgemeinen einen sehr starken Einfluss auf das Einsatzgeschehen (siehe Abbildung 83). Auch den physisch-geografischen Parametern –

Geländeform, Bodeneigenschaften, Bildung von Oberflächenabfluss – sowie der Kanalnetzkapazität und Besiedlungsdichte wurde jeweils ein sehr starker Einfluss beigemessen. Alle Bevölkerungsfaktoren mit Ausnahme der soziodemografischen und sozioökonomischen Merkmale wurden mit einem hohen Einfluss bewertet. Besonders die Selbsthilfefähigkeit der Bevölkerung zeigte sich bei der Bewältigung des Ereignisses als substanzieller Faktor, der die Anzahl der Feuerwehreinätze erheblich verringern konnte. Eine Stärkung des Risikobewusstseins und der Eigenvorsorge wurde in Nordwalde im Nachgang des Ereignisses im Rahmen von Bürgerinformationsveranstaltungen auch aktiv angegangen.

Starkregen in Nordwalde am 26-27. August 2010 - Ereignisfallstudium

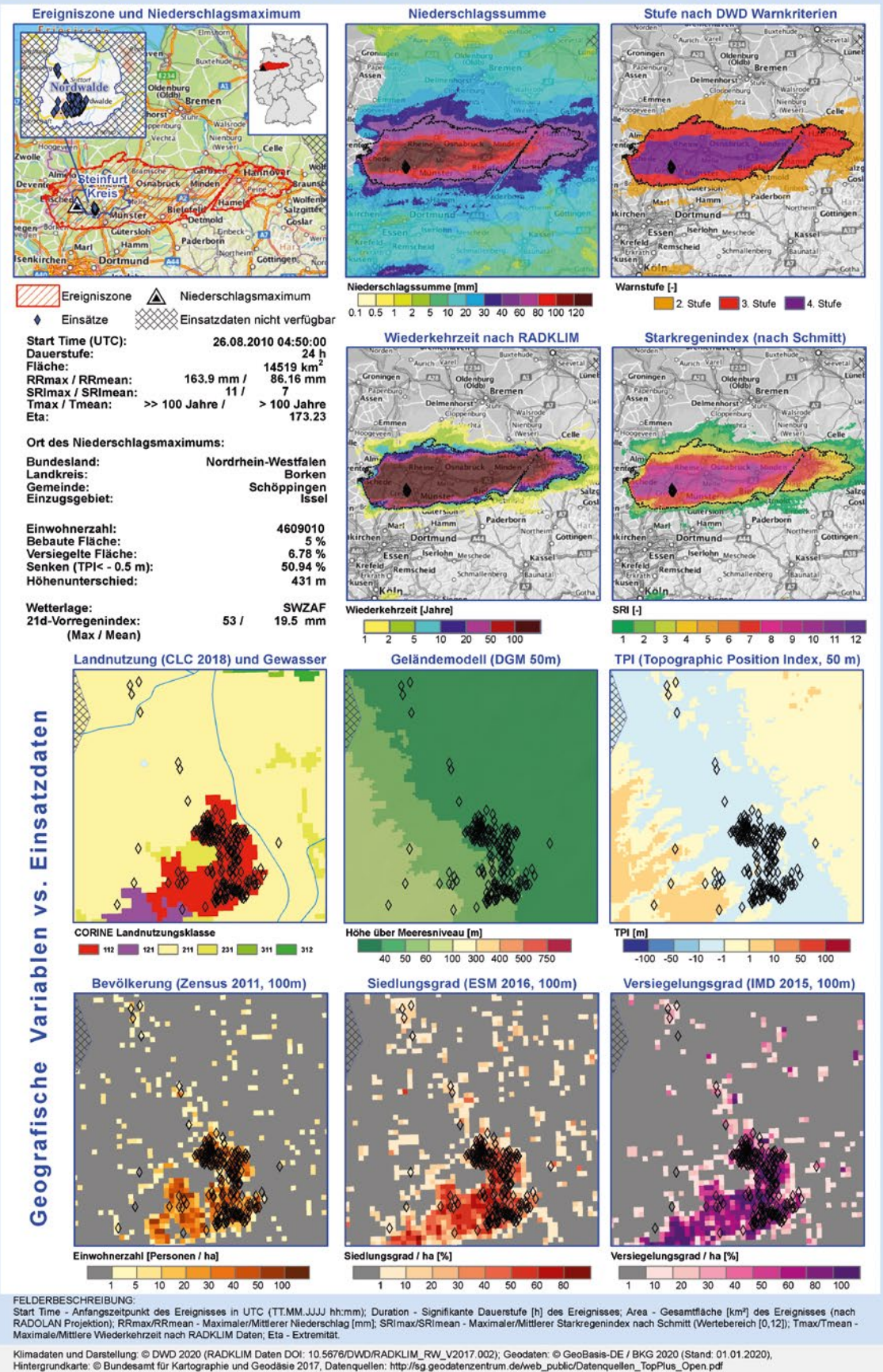


Abb. 82: Factsheet zum Ereignis am 26. und 27. August 2010 in Nordwalde.

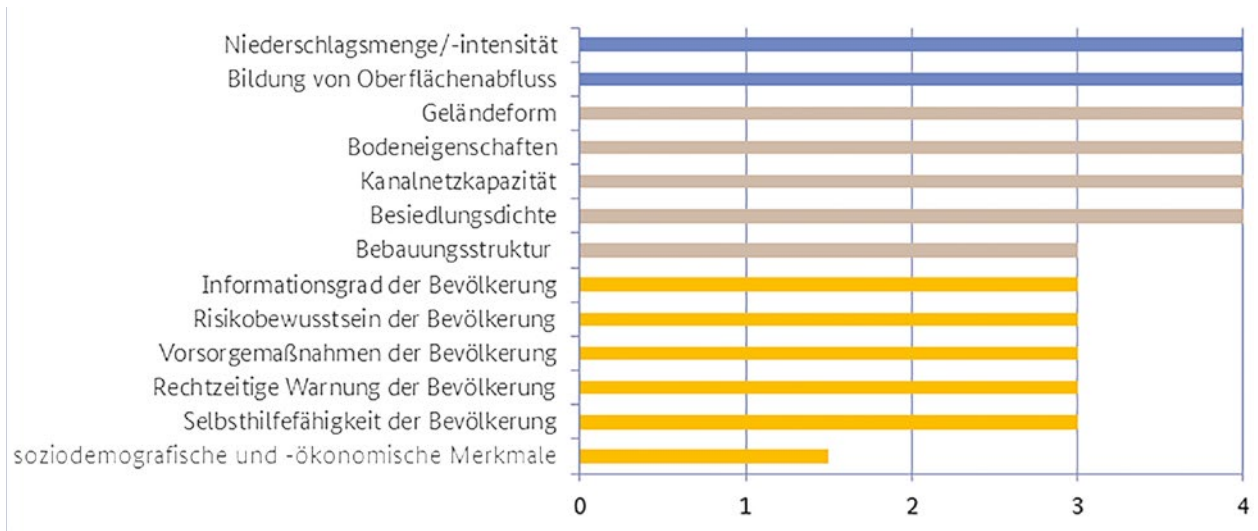


Abb. 83: Beurteilung von Einflussfaktoren auf die Herausbildung von Einsatzstellen bei Starkregen aus Sicht des Interviewpartners der Gemeinde Nordwalde. Der Wert 0 steht für keinen Einfluss, 4 für einen sehr starken Einfluss.

7.3.6. Potsdam und Umgebung

Potsdam und seine Umgebung liegen im Nordwesten von Brandenburg. Diese Bereiche sind geprägt durch zahlreiche Wälder und die Seenkette der Havel (LANDESHAUPTSTADT POTSDAM o. J.). Letztere durchfließt auch den Westen der Stadt Potsdam. Die Topografie ist sehr flach und hat keine nennenswerten Erhebungen. Für die ungefähr 500.000 Einwohner der Stadt Potsdam und der umgebenden Landkreise Havelland, Prignitz und Ostprignitz-Ruppin ist die Regionalleitstelle Nordwestbrandenburg zuständig. Die Stadt Potsdam hat insgesamt 17 Feuerwehren, darunter 2 Berufsfeuerwachen mit ca. 180 Mitarbeitern sowie 15 Gerätehäuser der Freiwilligen Feuerwehr mit insgesamt etwa 200 bis 250 aktiven Mitgliedern (INTERVIEW POTSDAM). Aufgrund der Zuständigkeit des Interviewpartners für die Stadt

Potsdam sind genauere Angaben zur Organisation der Feuerwehr in den umliegenden Landkreisen nicht bekannt.

In Potsdam und Umgebung konnten in den Jahren 2015 bis 2019 insgesamt 96 Starkregenereignisse identifiziert werden, von denen 20 Ereignisse eine Summe von 767 Einsätzen zur Folge hatten (siehe Abbildung 84). Besonders auffällig sind dabei die Einsatzzahlen der Jahre 2017 und 2019 im Unterschied zum Jahr 2018. In den Jahren 2018 und 2019 traten nahezu gleich viele Ereignisse auf, die Zahl der Einsätze unterscheidet sich jedoch markant mit einer fünffach höheren Einsatzanzahl im Jahr 2019 gegenüber dem Jahr 2018. Im Jahr 2017 riefen nur 4 der insgesamt 17 Ereignisse sogar eine noch höhere Gesamteinsatzzahl hervor. Im Folgenden wird eines dieser Ereignisse, der 29./30.06.2017, näher analysiert.

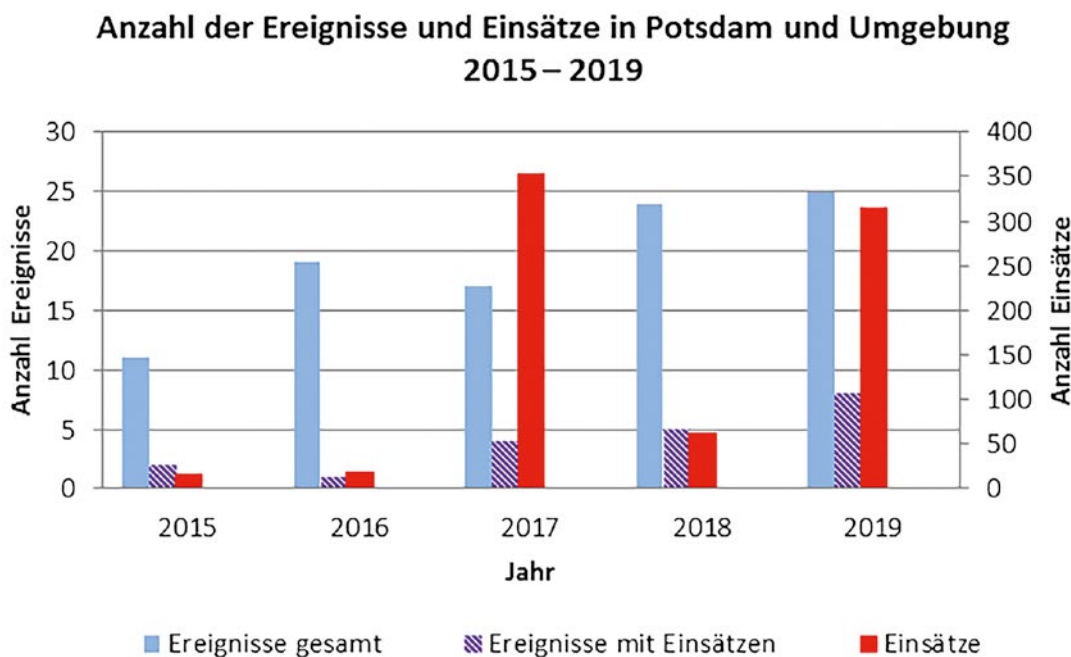


Abb. 84: Anzahl der Ereignisse und Einsätze in Potsdam und Umgebung für die Jahre 2015 bis 2019. Die schraffierten Balken geben die Anzahl der Ereignisse aus der Gesamtzahl der das Gebiet schneidenden Ereignisse wieder, denen die Einsätze zugeordnet werden konnten.

7.3.6.1. Meteorologische Ereignisbeschreibung

Am Abend des 28. Juni 2017 und in der darauffolgenden Nacht überquerte ein markanter Randtrog die Alpen nordwärts und löste über Tschechien eine Teiltiefentwicklung aus. Daraus resultierten im Süden teils gewittrige Starkregenfälle, die sich im Tagesverlauf nordostwärts ausbreiteten. Am 29. Juni 2017 zogen der Randtrog und das korrespondierende Bodentief weiter nach Norden, wobei die Zugbahn des Tiefs auf polnischer Seite entlang von Neiße und Oder erfolgte. Die zugehörigen Hebungsprozesse interagierten dabei mit feuchter und labil geschichteter Subtropikluft aus dem zentralen Mittelmeerraum, die auf der Vorderseite nach Norden bzw. Nordwesten verfrachtet wurde. Von Polen her zogen neue Gewitter über Teile Sachsens und Brandenburgs langsam west-nordwestwärts. Neben dem in der Folge ausführlich analysierten Niederschlagsereignis im Osten gab es auch im Nordwesten, zwischen Hannover und dem Jadebusen, kräftige Gewitter mit Starkniederschlag. Vor allem im Berliner Raum traten extreme Regenfälle auf. Der

Flughafen Berlin-Tegel meldete einen Tageswert von 196,9 mm Niederschlag zwischen 06:00 UTC am 29.06.2017 und 06:00 UTC am 30.06.2017. Der Starkregenindex deutet mit Werten zwischen 7 und 12 (Maximalwert) auf die Schwere des Ereignisses hin.

7.3.6.2. Schadensausmaß

Während des lang anhaltenden Ereignisses wurden zahlreiche Hauptverkehrsstraßen der Stadt Potsdam überschwemmt. Besonders betroffen waren dabei die Innenstadt, Potsdam-West und das südliche Stadtgebiet. In manchen Teilen war die Kanalisation so überlastet, dass die Regenmengen nicht mehr abtransportiert werden konnten. Das Wasser sprudelte daher aus den Gullys wieder an die Oberfläche und sammelte sich in Straßen und Kellern. Betroffen waren hauptsächlich Privathaushalte, aber auch ein Botschaftsgebäude, eine städtische Tiefgarage und andere öffentliche Infrastruktur. Im Kreis Teltow-Fläming drang das in den Straßen angestaute Regenwasser über die Toiletten bis in obere Stockwerke vor (MAZ 2017).

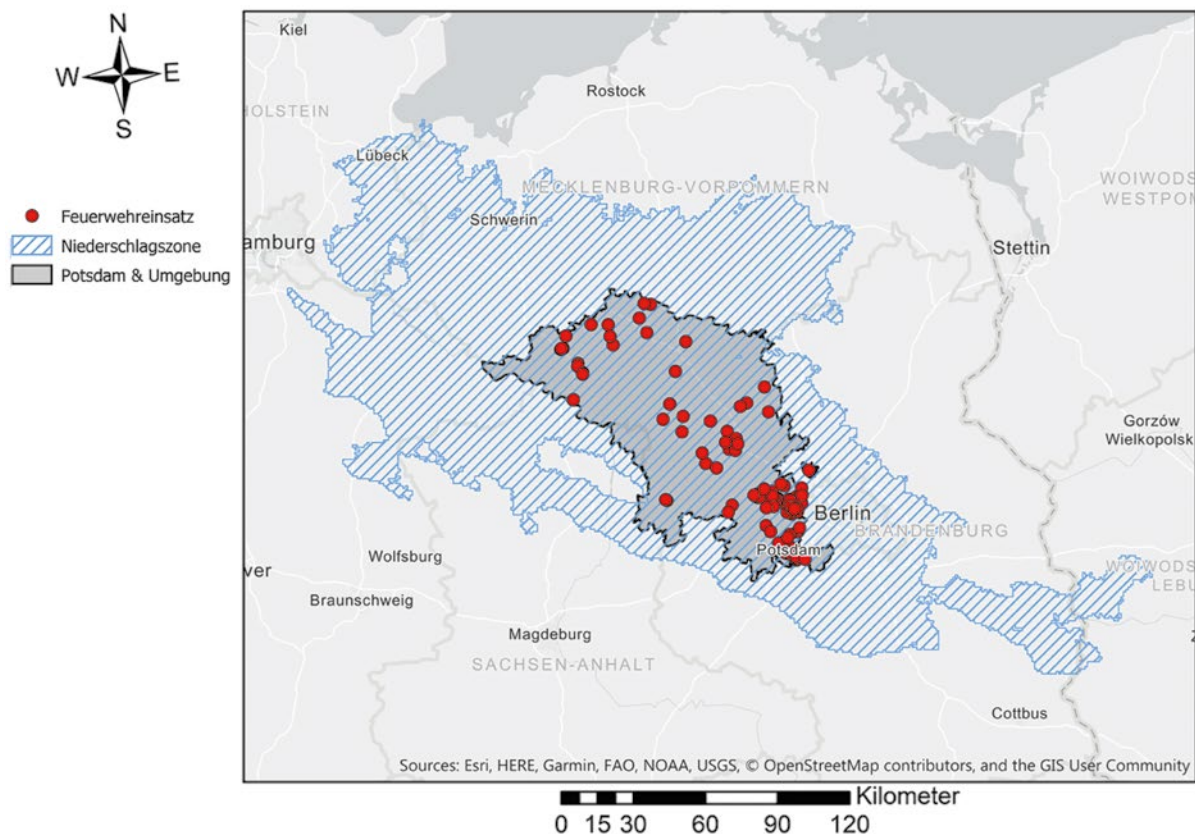


Abb. 85: Verteilung der Einsätze am 29.06. – 30.06.2017 in Potsdam und Umgebung (Quelle der Karte: GADM 2018).

7.3.6.3. Einsatzgeschehen

Für das Starkregenereignis vom 29.06. bis 30.06.2017 zeigt der Einsatzdatensatz aus Potsdam und Umgebung insgesamt 239 Einsätze. Schwerpunkte lagen hierbei vor allem auf der Potsdamer Innenstadt und auf der nahe gelegenen Stadt Falkensee (vgl. Abbildung 85). Ansonsten kann man von einer breiten räumlichen Streuung der Einsätze sprechen. Von weiteren hohen Einsatzzahlen aus umliegenden Landkreisen kann ausgegangen werden (vgl. MAZ 2017).

Nach einem Beginn der Einsatzfähigkeit gegen 11 Uhr des 29.06.2017 trat eine Häufung der Einsätze ab ca. 15 Uhr auf. Laut des Interviewpartners aus Potsdam schien zu diesem Zeitpunkt „eine Schwelle überschritten“ worden zu sein, ab der „die Stadt dann nicht mehr damit klar kam – warum auch immer“ (Interview Potsdam). Die letzte Einsatzmeldung traf erst am 30.06.2017 gegen 22 Uhr ein. Mit insgesamt 42 Stunden dauerhafter Einsatzfähigkeit lag damit eine lang anhaltende Belastung der Einsatzkräfte vor. Das THW konnte am 29.06.2017 mit 42 Helfern bei 4 Einsätzen in Potsdam-Mittelmark und einem Einsatz im Havelland unterstützen. Es trat allerdings auch die Situation ein, dass aufgrund der Bindung des THW in bestehenden Einsätzen eine Feuerwehr in Oranienburg (Oberhavel) mit ihren zur Verfügung stehenden Pumpen allein versuchen musste, „die Wassermassen in den Griff zu bekommen“ (MAZ 2017, o. S.).

7.3.6.4. Analyse von Einflussfaktoren auf die Bildung von Einsatzschwerpunkten

a) Ergebnisse der Korrelationsrechnungen

Auf Abbildung 87 ist zu erkennen, dass die Einsätze nicht im Bereich der Zone mit dem stärksten Niederschlag (hohe Niederschlagssummen und Wiederkehrzeiten) liegen, was jedoch wiederum damit zu begründen ist, dass für andere Bereiche der Niederschlagszone keine Einsatzdaten vorlagen. Die Korrelation zwischen den meteorologischen Parametern und der Anzahl der Einsätze zeigt im Wesentlichen keinen signifikanten Zusammenhang (vgl. Tabelle 15).



Abb. 86: Einsatz der Feuerwehr Potsdam nach dem Starkregenereignis im Juni 2017 (Quelle: Feuerwehr Potsdam).

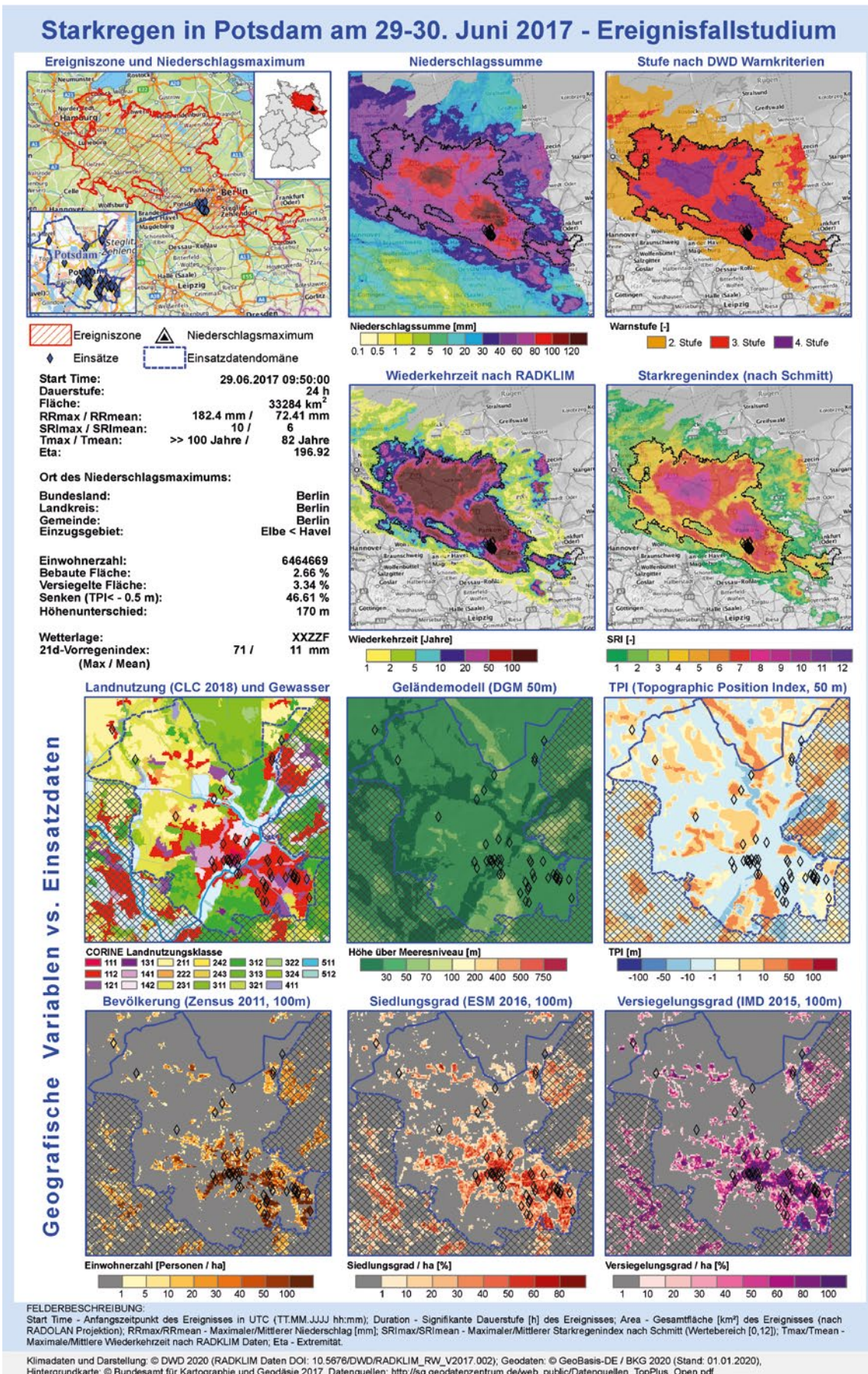


Abb. 87: Factsheet zum Ereignis am 29. und 30. Juni 2017 in Potsdam.

Niederschlagsereignis		Potsdam	
		29.06.2017 (D = 24 h, 09:50)	
URBANISIERUNG	Einwohnerzahl (Summe/1 km ²)	0,54	***
	Versiegelungsgrad (% pro 1 km ²)	0,48	***
	Siedlungsgrad (% pro 1 km ²)	0,46	***
TOPOGRAFIE	Geländehöhe (Median aus 1 km ²)	-0,02	-
	Topographic Position Index (Median aus 1 km ²)	-0,13	-
EREIGNIS- ATTRIBUTE 1. Ereignis	Niederschlagssumme über Ereignisdauer	0,12	-
	Starkregenindex nach Schmitt	0,07	-
	Warnstufe DWD (2/3/4)	-0,03	-
	Wiederkehrzeit nach RADKLIM-Daten	0,04	-
	21-tägiger Vorregenindex	0,01	-

Tab. 15: Korrelationsrechnungen für Potsdam und Umgebung

Die rötliche Einfärbung steht für einen positiven, die bläuliche für einen negativen Zusammenhang. Je dunkler die Einfärbung, desto stärker der Zusammenhang. Die Signifikanz der Korrelation wird jeweils in der 2. Spalte abgebildet, wobei * $p < 0,05$ (95 %), ** $p < 0,01$ (99 %), *** $p < 0,001$ (99,9 %), - nicht signifikant ($p > 0,5$).

In Bezug auf das Geländemodell und den TPI ist zu erkennen, dass die meisten Einsätze im Flachland in leichter Senkenlage auftraten, wobei vereinzelt auch erhöhte Gebiete betroffen waren. Eine signifikante Korrelation konnte bezüglich dieser beiden Faktoren nicht ermittelt werden. Mit hohen positiven Korrelationen haben dagegen auch in diesem Fallbeispiel die Siedlungsparameter einen starken Einfluss auf die Herausbildung von Einsatzstellen.

b) Ergebnisse der Bewertung durch den Interviewpartner

Da die Bewertung der Einflussfaktoren für das konkrete Ereignis schwierig von der Bewertung ihrer generellen Bedeutung zu trennen war, spiegeln die folgenden Ausführungen sowohl Besonderheiten des betrachteten Ereignisses als auch darüber hinausgehende Erfahrungen mit den jeweiligen Faktoren wider.

Nach Einschätzung des Interviewpartners aus Potsdam haben die Niederschlagsmenge und -intensität im Allgemeinen einen starken bis sehr starken Einfluss auf die Entstehung von Einsatzstellen (siehe Abbildung 88). Hinsichtlich der hierbei nicht näher untersuchten Niederschlags-

dauer wurde angemerkt, dass ein länger andauerndes Ereignis meist eine leichtere, da sukzessive Abarbeitung der Einsatzstellen ermögliche, da hierbei anders als bei sehr kurzen, heftigen Ereignissen nicht nahezu alle Einsatzmeldungen zeitgleich einträfen.

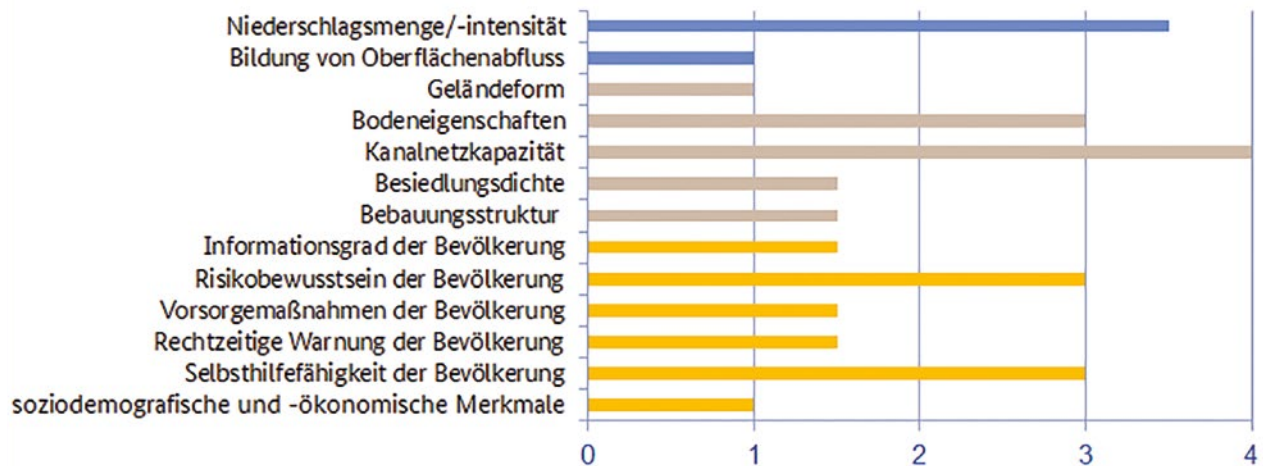


Abb. 88: Beurteilung von Einflussfaktoren auf die Herausbildung von Einsatzstellen bei Starkregen aus Sicht des Interviewpartners der Feuerwehr Potsdam. Der Wert 0 steht für keinen Einfluss, 4 für einen sehr starken Einfluss.

Weiterhin wurde der Kanalnetzkapazität sowie den Bodeneigenschaften jeweils eine hohe Bedeutung beigemessen. Aus der Erfahrung seien demnach „gerade Stadtgebiete mit alten und Mischwassersystemen wirklich überfordert“ gewesen (Interview Potsdam). Auch die Beobachtung, dass stark ausgetrocknete Böden kaum Versickerung ermöglichten, floss in die o. g. Bewertung ein. Der Geländeform und der Bildung von Oberflächenabfluss wurden für Potsdam aufgrund weniger Hanglagen eher ein geringer Einfluss beigemessen, sie wurden aber generell als bedeutsam angesehen. Die Besiedlungsdichte und die

Bebauungsstruktur wurden speziell für Potsdam aufgrund der lockeren Siedlungsstruktur und zahlreicher Freiflächen mit einem eher geringen Einfluss bewertet. Auch den Bevölkerungsfaktoren kommt nach Ansicht des Interviewpartners eine eher geringe Bedeutung auf die Bildung von Einsatzstellen zu. Am ehesten könnten jedoch die Selbsthilfefähigkeit und das Risikobewusstsein der Bevölkerung den Zusammenhang zwischen Ereignis und Einsatzgeschehen beeinflussen. Die soziodemografischen und -ökonomischen Merkmale hätten dagegen keinen nennenswerten Einfluss.

7.3.7. Vergleich der Fallstudien

Im Vergleich der 6 Fallstudiengebiete fällt auf, dass die meteorologischen Faktoren nicht gleichermaßen Einfluss auf die Zahl der Einsätze genommen haben. In Köln, Wuppertal, der Städteregion Aachen sowie in der Region Bamberg-Forchheim traten moderate bis mittlere Korrelationen mit der Niederschlagssumme, dem Starkregenindex und der DWD-Warnstufe auf. Die Wiederkehrzeit spielte im Fall Aachen eine Rolle, der Vorregenindex insbesondere bei dem „Doppelereignis“ in Köln. In Bad Doberan dürfte ebenfalls das vorangegangene Ereignis des Vortages ausschlaggebend für die Entstehung von Einsätzen bei eigentlich nicht markant erhöhten Niederschlagswerten gewesen sein, was die moderate, jedoch nicht signifikante Korrelation zum Vorregenindex belegt. Ein bereits gesättigter Boden und eine noch mit Regenwasser „vorbelastete“ Kanalisation können nachvollziehbar weniger Niederschlag aufnehmen, was sich in verstärktem Oberflächenabfluss und daraus hervorgehenden Einsatzstellen äußert. In den übrigen Fallgebieten traten die meteorologischen Parameter im Rahmen der Korrelationsanalysen nicht in relevanter Weise hervor. Das heterogene Gesamtbild lässt darauf schließen, dass eine hohe Niederschlagsmenge und -intensität zwar eine notwendige, aber keine hinreichende Bedingung für die Bildung von Gefahren- und Einsatzstellen darstellt.

Der Einfluss der Topografie fällt bei den Untersuchungsgebieten nachvollziehbar unterschiedlich aus: Dort, wo markante Höhenunterschiede gegeben sind (z. B. in Wuppertal), trat ein stärkerer Zusammenhang zur Lokation und Anzahl der Einsätze auf. Wie etwa das Beispiel Potsdam zeigte, kann das Vorliegen von Senken die Entstehung von Gefahren- und Einsatzstellen begünstigen, auch wenn die Niederschlagssummen über dem Gebiet nicht maximal ausfallen bzw. der Schwer-

punkt des Ereignisses außerhalb des betreffenden Gebietes liegt. Die absolute Höhe über dem Meeresspiegel scheint dabei insgesamt weniger eine Rolle zu spielen als die relativen Höhenunterschiede, was die tendenziell etwas stärkeren Korrelationen mit dem TPI zeigen.

Am stärksten aber scheint das Zusammenspiel mit den Siedlungsfaktoren für die Wirkung eines Niederschlagsereignisses von Bedeutung, denn die meteorologischen Ereignisattribute wirkten sich besonders in den dicht besiedelten Städten signifikant auf die Zahl der Einsätze aus. Dies wird durch die zumeist hohen signifikanten Korrelationen mit allen untersuchten Siedlungsparametern – Einwohnerzahl, Siedlungsgrad und Versiegelungsgrad – unterstrichen und bestätigt damit die Ergebnisse aus Kapitel 7.2 auch für die Einzelereignisse.

Abbildung 89 zeigt den Zusammenhang zwischen den Parametern TPI (y-Achse), Versiegelungsgrad (x-Achse), Niederschlagsintensität (Farbe) und Einsatzzahlen (Größe der Kreise) für die betrachteten Starkregenereignisse in einer kombinierten Darstellung. Die Abbildung verdeutlicht dabei nochmals besonders den Einfluss von Senken (mehr und größere Kreise unterhalb der Linie), oftmals auch in Kombination mit einem hohen Versiegelungsgrad. Sehr deutlich ist dieser Zusammenhang am Beispiel des Ereignisses in Wuppertal zu erkennen, wo hohe Einsatzzahlen (große Kreise) ausschließlich bei einem negativen TPI und einem hohen Versiegelungsgrad auftreten. Eine Ausnahme stellt das Kölner Ereignis dar, wo kein Zusammenhang mit dem TPI zu erkennen ist. Ein eindeutiger Zusammenhang zur Niederschlagsintensität ist nicht zu sehen; tendenziell treten bei sehr geringen Niederschlagsintensitäten (gelbe Kreise) jedoch in der Regel nur wenige Einsätze auf, während hohe Einsatzanzahlen sowohl bei mittleren als auch hohen Niederschlagsintensitäten festzustellen sind.

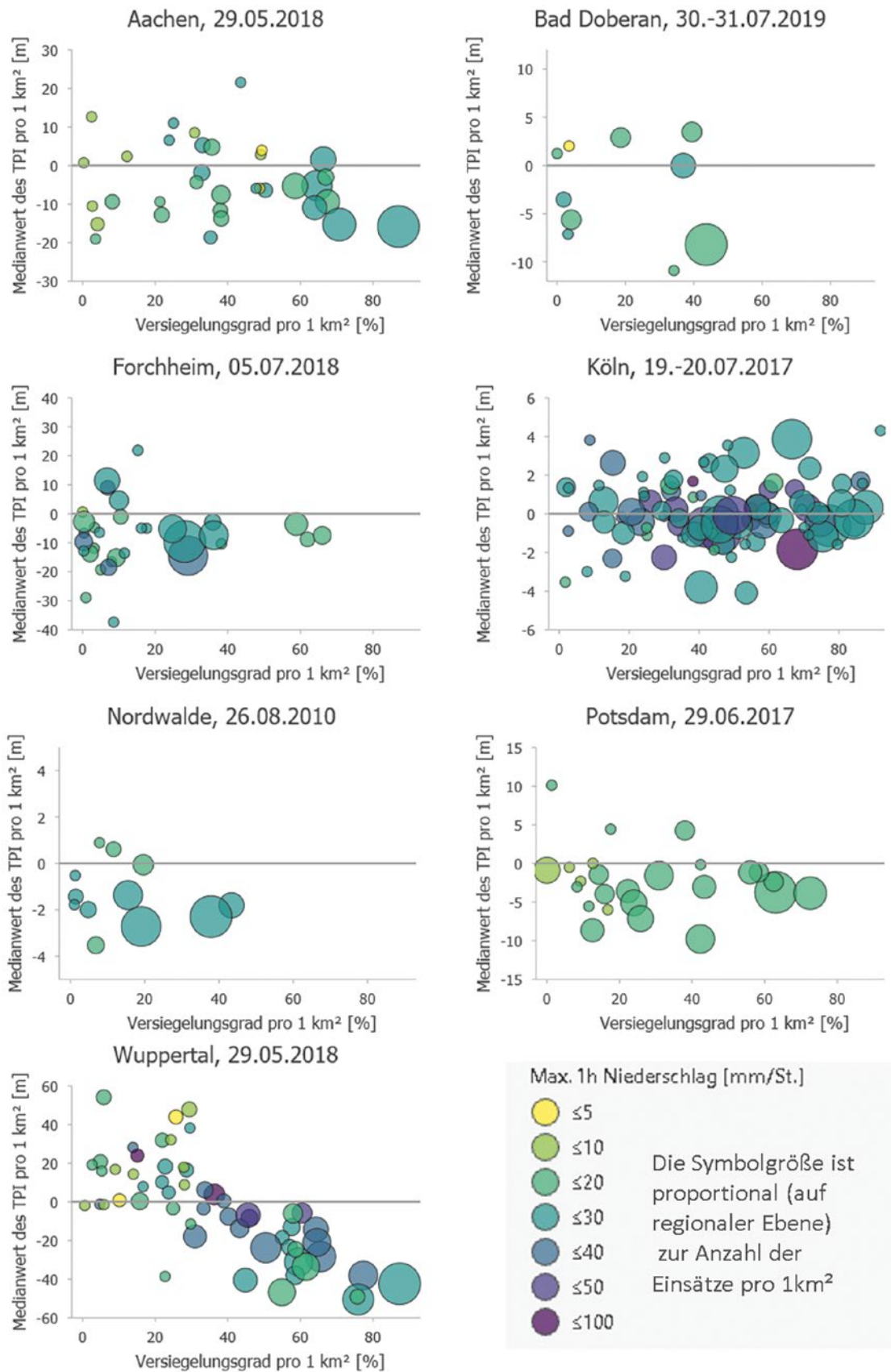


Abb. 89: Kombierter Zusammenhang zwischen den Parametern TPI (y-Achse), Versiegelungsgrad (x-Achse), Niederschlagsintensität (Farbe) und resultierenden Einsätzen (Größe der Kreise) für die betrachteten Starkregenereignisse.

Die Bildung von Einsatzstellen wird dabei mit hoher Wahrscheinlichkeit durch eine Reihe weiterer Faktoren beeinflusst, die als solche nicht den Daten zu entnehmen sind. Der Einschätzung der Interviewpartner zufolge haben insbesondere das Risikobewusstsein und die Selbsthilfefähigkeit der Bevölkerung gefolgt von ihrem Informationsstand einen markanten Einfluss auf die Zahl der Einsätze. Dies hat das Fallbeispiel Nordwalde eindrücklich gezeigt, bei dem rund 100 Einsatzstellen eigenständig durch die Bürgerinnen und Bürger abgearbeitet wurden und somit die Feuerwehr substanziell entlastet werden konnte. Eine rechtzeitige Warnung der Bevölkerung und Vorsorgemaßnahmen wurden mit Blick auf die geringen Vorwarnzeiten bei Starkregenereignissen von der Mehrzahl der Interviewpartner nur eingeschränkt als wirksam erachtet. Mit dem geringsten Einfluss wurden soziodemografische und sozioökonomische Merkmale bewertet, wenngleich das Alter von einigen als ausschlaggebend für die Fähigkeit zur Selbsthilfe hervorgehoben wurde. Inwieweit Unterschiede hinsichtlich des Vorsorge- und Selbsthilfegrades zwischen städtischen und ländlichen Regionen bestehen, kann nicht mit Sicherheit gesagt werden. Die Annahme steht im Raum, dass diese Fähigkeiten im ländlichen Raum insgesamt etwas höher ausgeprägt sind und insbesondere die stärkere Vernetzung untereinander dazu beitragen kann, voreiligen Notrufen durch eine wirksame Nachbarschaftshilfe entgegenzuwirken.

Nicht eindeutig zu belegen ist auch der Einfluss der Bebauungsstruktur, dem vonseiten der Interviewpartner insgesamt eine mittlere Bedeutung beigemessen wurde. Der Zusammenhang zwischen Einsätzen und Einwohnerzahl bzw. Bevölkerungsdichte könnte durch unterschiedliche Wohnsituationen moderiert werden, indem Mehrfamilienhäuser gemessen an ihrer Bewohnerzahl eine andere Betroffenheit generieren als Einfamilienhäuser. Da auch bei einer Vielzahl von Bewohnern eines Hochhauses das Wasser „nur einmal“ im Keller steht, sollten Gebiete mit Mehrfamilienhausstruktur trotz hoher Bevölkerungsdichte vergleichsweise weniger Einsätze hervorrufen, als dies in Gebieten mit überwiegender Einfamilienhausbebauung der Fall ist. Ein solcher

Zusammenhang wäre allerdings durch eine Überlagerung mit entsprechenden Bebauungsdaten erst noch zu untersuchen und überdies nur mit sehr hochaufgelösten Einsatzdaten möglich.



8.

Kapitel

Quelle: shutterstock/Romolo Tavani

Empfehlungen zum Umgang mit Starkregen im Bevölkerungsschutz und in der Stadtentwicklung

Die im Folgenden dargestellten Handlungsempfehlungen leiten sich zum einen aus den bisher dargelegten Projektergebnissen ab. Für die Vorschläge in Bezug auf den Bevölkerungs- bzw. Katastrophenschutz sind dies insbesondere die Ergebnisse aus der Befragung zur Einsatzdokumentation (Kapitel 6.1) und der Verknüpfung von Einsatzdaten mit Niederschlagsdaten und nicht-meteorologischen Informationen (Kapitel 7.2), ergänzt durch die Erkenntnisse aus den Fallstudien und den in diesem Zusammenhang geführten Experteninterviews (Kapitel 7.3). Zum anderen sind sie das Ergebnis zahlreicher informeller Gespräche, die im Rahmen des Projekts insbesondere mit Vertreterinnen und Vertretern der operativen nichtpolizeilichen Gefahrenabwehr geführt wurden und bestehende Bedarfe aus der konkreten Einsatzerfahrung verdeutlicht haben. Die Impulsvorträge und Diskussionsbeiträge im Rahmen der beiden Dialogveranstaltungen fügen sich als weitere Beiträge in die Reihe der seitens der verschiedenen föderalen Ebenen geschilderten Erfahrungen ein.

Wenngleich das Hauptaugenmerk im Projekt auf den Auswirkungen von Starkregenereignissen auf das Einsatzgeschehen liegt, spielen Aspekte der Raum- und Siedlungsplanung als vermittelnde Faktoren in diesen Zusammenhang ebenfalls hinein. Aus diesem Grund werden in einem zweiten Teil auch einige Vorschläge in Bezug auf die Stadtentwicklung angerissen, die sich als wesentlich für die Bildung bzw. Vermeidung von Einsatzstellen herausgestellt haben.

8.1. Maßnahmenvorschläge für den Bevölkerungsschutz

Sowohl auf der strategischen als auch auf operativer Ebene kann die Zusammenarbeit im Bevölkerungsschutz in der Vorbereitung auf und bei der Bewältigung von Ereignissen als „traditionell sehr intensiv und professionell“ beschrieben werden, „auch über Verwaltungsebenen hinweg“

(LAUWE 2018, S. 2). Auch im Hinblick auf Ereignisse im Zusammenhang mit dem Klimawandel beschreibt die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) den Bevölkerungsschutz aufgrund seiner Erfahrung im Umgang mit Extremereignissen und Großschadenslagen als grundsätzlich gut vorbereitet. Dieser Umstand gilt jedoch nicht uneingeschränkt: „Wenn zukünftig häufigere und heftigere wetter- und klimainduzierte Katastrophenfälle eintreten, können neue Herausforderungen für den staatlich verantworteten Bevölkerungsschutz entstehen, die seine materiellen Ressourcen, das Krisen- und Notfallmanagement sowie die Planung des operativen Einsatzes betreffen“ (DIE BUNDESREGIERUNG 2008, S. 44). Die in Kapitel 7.3 dargelegten Fallstudien haben einige dieser „neuen Herausforderungen“ in unterschiedlichen Phasen der Ereignisbewältigung beispielhaft aufgezeigt. In nahezu jeder der Fallanalysen wurde deutlich, dass trotz gewisser Vorbereitungen die Kapazitäten zur Bewältigung des Ereignisses an deutliche Grenzen gelangten. In der Folge wurden bei einigem Kommunen in unterschiedlichen Bereichen Maßnahmen getroffen, um für zukünftige Ereignisse besser gewappnet zu sein. Der Wunsch, über notwendige und sinnvolle Maßnahmen bereits im Vorfeld informiert gewesen zu sein, wurde von mehreren Stellen geäußert. Wenngleich Anpassungsvorschläge jeweils den individuellen Gegebenheiten einer Kommune und des Ereignisses angepasst werden müssen, ähneln Probleme und Bedarfe einander, sodass sich grundlegende Handlungsoptionen der Vor- und Nachsorge für solche Ereignisse formulieren lassen.

Praxisnahe Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Starkregen im Katastrophenschutz wurden auch in einer parallel zum Projekt erschienenen Masterarbeit zu den Einsatzerfahrungen nach Sturzflutereignissen erarbeitet (SCHMITZ-KRÖLL 2020). In Abstimmung mit dem Autor der Masterarbeit fließen einige dieser Ansätze in die folgenden Maßnahmenvorschläge ein.



Abb. 90: Ganzheitlicher Ansatz des Risiko- und Krisenmanagements (Quelle: BBK; https://www.bbk.bund.de/DE/Themen/Risikomanagement/risikomanagement_node.html).

Die inhaltliche Gliederung der Vorschläge folgt dabei den 4 Phasen des Risiko- und Krisenmanagementzyklus von der Prävention über die Vorbereitung und Bewältigung bis hin zur Nachsorge und dem Wiederaufbau (vgl. Abbildung 90). Die einzelnen Phasen, darunter insbesondere jene der Vorsorge, sind dabei nicht trennscharf voneinander abzugrenzen. Jene und vergleichbare Kreislaufdarstellungen werden jedoch oft für das Risikomanagement gewählt, um seinen fortlaufenden Charakter zu illustrieren getreu der Annahme, dass „nach dem Ereignis“ immer auch „vor dem folgenden Ereignis“ ist (KRINGS & GLADE 2017, S. 50). Die Reihenfolge der im Folgenden gelisteten Maßnahmen impliziert dabei keine Gewichtung nach Wichtigkeit oder Dringlichkeit. Ebenso wird kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben, sondern es werden vielmehr die Handlungsoptionen dargelegt, die sich aufgrund der Projektergebnisse als besonders sinnvoll und relevant erweisen.

8.1.1. Präventive Maßnahmen

Präventive Maßnahmen sind solche, die im Vorfeld möglicher Schadensereignisse getroffen werden. Auch wenn mit ihrem Eintreten nicht sicher zu rechnen ist und die gewählten Maß-

nahmen nicht zwingend zum Tragen kommen, sind sie geeignet und zum Teil notwendig, um die Wirkung der Ereignisse abzumildern und einen zielgerichteten Umgang mit ihren Folgen zu erwirken. Die Projektergebnisse haben gezeigt, dass potenziell jeder Ort in Deutschland auch unabhängig von seinen geografischen Gegebenheiten von einem Starkregenereignis getroffen werden kann (vgl. Kapitel 5), sodass es ratsam ist, sich mit diesem Thema präventiv auseinanderzusetzen. Die im Folgenden dargestellten Maßnahmenoptionen beziehen sich dabei weniger auf die Vermeidung von Schäden infolge des Ereignisses, sondern zielen vielmehr auf einen zielgerichteten Umgang mit den Ereignisfolgen und einer daraus hervorgehenden Vermeidung von Überforderung durch die Einsatzorganisationen ab. Die Empfehlungen sind dabei überwiegend dem Bereich der „no regret“-Maßnahmen zuzuordnen, sogenannte „Maßnahmen ohne Reue“. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass sie ihre positive Wirkung auch dann entfalten, wenn klimatische Veränderungen nicht in dem angenommenen Ausmaß auftreten oder ihre Auswirkungen weniger schwerwiegend sein sollten (BBK 2019b).

8.1.1.1. Sicherstellung der Einsatzfähigkeit

Die Bewältigung von Starkregenereignissen wird erschwert, wenn die Einsatzorganisationen durch die Folgen des Ereignisses selbst in einer einschränkenden Art und Weise betroffen sind. Dies kann z. B. durch die Überflutung von Gerätehäusern und Zufahrtswegen – auch zu den Sammelpunkten – oder durch sekundär, infolge des Ereignisses auftretende Stromausfälle in den Liegenschaften der Fall sein. Eine solche Eigenbetroffenheit kann die Einsatzbereitschaft schwächen oder zumindest zu einer zeitlichen Verzögerung bei der Aufnahme der Einsatz Tätigkeiten führen (BBK 2019b, KUTSCHKER & GLADE 2016).

Im Rahmen der betrachteten Fallbeispiele traten keine Schäden oder Infrastrukturausfälle an den Liegenschaften der Feuerwehr auf. Die Gerätehäuser der Feuerwehr Aachen beispielsweise seien lage- und gebäudetechnisch gut geschützt und werden aus der Erfahrung auch nicht als gefährdet angesehen (WISCHOTT 2020). Aus anderen Erhebungen wird jedoch deutlich, dass dies nicht die Regel ist. Im Rahmen einer 2011 durchgeführten Befragung des BBK unter Einsatzorganisationen wurde seitens vieler Teilnehmenden über Sturmschäden und Überschwemmungen an den eigenen Liegenschaften berichtet (BBK 2019). Als schwierig stellt sich zudem regelmäßig der Umstand heraus, dass teilweise in Unterbesetzung agiert werden muss, da es aufgrund der privaten Betroffenheit einiger Feuerwehrmitglieder zu Personalausfällen kommt (vgl. auch Interview Bamberg II). Diesbezüglich kann im Grunde auch nicht mehr als die auch für alle übrigen Bürgerinnen und Bürger geltenden Empfehlungen ausgesprochen werden, Vorsorge zum Schutz des Eigenheims zu betreiben und im Ereignisfall die geltenden Verhaltensregeln zum Selbstschutz zu beachten.

Um jedoch Schäden oder Ausfälle an den eigenen Liegenschaften zu vermeiden und somit die Hilfeleistung gerade dann zu gewährleisten, wenn sie am dringendsten gebraucht wird, sind Maßnahmen zum Erhalt der Einsatzfähigkeit durch eine Härtung gegenüber Wetterextremen zu treffen (vgl. auch HAHN et al. 2020). In einem ersten Schritt sollte dazu eine Gefährdungsana-

lyse durchgeführt und im Zuge dessen Gebäude, Zufahrtswege, Türen/Tore und wichtige Geräte auf mögliche Schwachstellen, beispielsweise gegenüber eindringendem Wasser, überprüft werden. Hierbei sollte insbesondere auch die eigene Abhängigkeit von potenziell ausfallgefährdeten Infrastrukturen wie der Stromversorgung, Kommunikationsnetze oder der IT geprüft werden. Ausgehend von der Risikoanalyse können zielgerichtete Maßnahmen abgeleitet werden, die geeignet sind, die identifizierten Schäden oder Ausfälle zu vermeiden oder zumindest in ihrer Wirkung zu mindern.

Die Einrichtung einer Notstromversorgung stellt ein Beispiel für eine einfache, aber wirksame Maßnahme dar. In einem der Fallstudiengebiete etwa wurde sie für jedes Gerätehaus angelegt. Ein anderer Gesprächspartner berichtete, dass beim Neubau der Feuerwache darauf geachtet worden sei, dass diese u. a. durch mehrfache Stromeinspeisungen weitestgehend autark in Funktion gehalten werden könne. Für weitere konkrete Maßnahmen zum Erhalt der Einsatzfähigkeit wie bspw. der Sicherstellung der Erreichbarkeit über unterschiedliche Kommunikationskanäle sei an dieser Stelle auf die Ausführungen in OTT et al. (2018, ab S. 114) verwiesen. Auch die konkreten Schritte zur Durchführung einer Gefährdungsanalyse oder praktische Hinweise zur Einrichtung einer Notstromversorgung werden bereits in Handreichungen des BMI und des BBK thematisiert (BMI 2011, BBK 2019d), sodass hier auf eine nähere Ausführung verzichtet wird.

8.1.1.2. Anpassung der Einsatz- und Personalmittel

Wie auch die Fallanalysen gezeigt haben, sind Einsatzlagen nach Starkregenereignissen in vielen Fällen nur mit einem massiven Kräfte- und Materialeinsatz zu bewältigen. Diese Bedarfe sind mit dem Personal und Material einer regulär ausgestatteten Feuerwehr häufig nicht zu decken. Erschwerend kommt hinzu, dass über die üblichen Einschränkungen (z. B. Tagesverfügbarkeit der Mitglieder) hinaus im Ereignisfall oft nicht die theoretisch maximal mögliche Personalstärke zur Verfügung steht, da eine gewisse Anzahl an Feuerwehrkräften persönlich von der Situation

betroffen ist und somit bereits vor oder während des Einsatzes ausfällt (vgl. oben). Eine personelle Aufstockung innerhalb der Organisationen scheidet in der Regel aufgrund der Tatsache aus, dass es sich bei den Feuerwehren überwiegend um Freiwillige Feuerwehren handelt, deren Kräfte ehrenamtlich tätig sind (vgl. KUTSCHKER 2018). Langfristig sollte jedoch eine noch stärkere Bewerbung des Ehrenamts – insbesondere auf lokaler Ebene – stattfinden, die sich nicht nur vor dem Hintergrund des Klimawandels, sondern auch angesichts der demografischen Entwicklungen als sinnvoll erweisen würde (vgl. HAHN et al. 2020).

Um den kurzfristigen Kräftebedarf zu decken, bedarf es demnach der Unterstützung durch überörtliche Einheiten. KUTSCHKER & GLADE (2016) gehen davon aus, dass aufgrund der für Starkregen typischen räumlichen Begrenzung hierfür unter Umständen auch in der unmittelbaren Nachbarschaft Kräfte zur Verfügung stehen können. Andererseits zeigten einige der Fallbeispiele, dass sich die Betroffenheit durch das Ereignis auch auf andere Gebietskörperschaften ausweitete und daher eine Unterstützung durch diese Einheiten nicht oder nur begrenzt möglich war. Zur effektiven Realisierung der überörtlichen Hilfe sollten daher vorgeplante Konzepte erstellt werden, die jenen Umstand der möglichen zeitgleichen Betroffenheit berücksichtigen und demnach auf einen größeren räumlichen Radius ausgelegt sind. In bestehenden landesweiten Konzepten sind üblicherweise sowohl die schwerpunktmäßigen Fähigkeiten der jeweiligen Kontingente als auch die dafür benötigten Personalstärken und Einsatzfahrzeuge festgelegt (vgl. z. B. MINISTERIUM DES INNERN DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN 2017). So haben die anfordernden Stellen die Möglichkeit, sich die „passenden“ Kontingente auszusuchen und gezielt anzufordern. Da zudem festgeschrieben ist, welche Gebietskörperschaften welche Fahrzeuge und Personalstärken für die jeweiligen Konzepte zur Verfügung stellen müssen, bedarf es auch in dieser Hinsicht keiner spontanen Planung mehr. Somit ist gewährleistet, dass selbst große Einsatzverbände mit größtenteils standardisierter Ausrüstung nach

einer gewissen Vorlaufzeit – mit dem Abmarsch solch einer Komponente kann beispielsweise in Nordrhein-Westfalen etwa 2 Stunden nach der Alarmierung gerechnet werden – zur Verfügung stehen.

Vergleichbare vorgeplante Konzepte zur überörtlichen Hilfe finden sich auch auf niedrigeren Verwaltungsebenen, etwa auf Kreisebene (SCHMITZ-KRÖLL 2020). Vorteile dieser lokalen Systeme sind eine schnellere Verfügbarkeit, die mitunter persönliche Bekanntheit der Kräfte untereinander und möglicherweise auch eine gewisse (Orts-) Kenntnis des Einsatzgebiets. Zudem können Konzepte auf niedrigen Organisationsebenen besser auf die jeweiligen örtlichen Einsatzerfordernisse abgestimmt werden, als dies bei landkreisübergreifenden Konzepten der Fall ist.

Diese vorgeplanten kommunalen Kontingente stellen gerade für die Anfangsphase nach einem Ereignis eine sinnvolle Maßnahme zur Sofortverstärkung dar. Bei langandauernden, intensiven Einsatzlagen können sie die dann benötigte Menge an Personal und Material allein jedoch zumeist nicht mehr aufbringen und sollten deshalb zu einem späteren Zeitpunkt durch (über-)regionale Einheiten ergänzt und/oder abgelöst werden.

Der Kräftebedarf kann mitunter durch spezielle Einsatzmittel reduziert werden (vgl. OTT et al. 2018). Dabei müssen Kosten und Nutzen von Spezialausstattungen gut gegeneinander abgewogen werden. Vielfach lassen sich bereits mit einfachen Maßnahmen Abläufe vereinfachen, was einer der Interviewpartner am Beispiel seiner Fahrzeugausstattung verdeutlichte: *„Ich habe zum Beispiel bei mir in meinem LKW 30 Vorlagen [...] mit Ortsplänen, mit Erfassung von Einsatzstellen, mit Kugelschreibern. [...] Ich könnte also 30 Einheiten sofort mit Material, mit Kartenmaterial losschicken. Das ist nämlich auch ganz wichtig, wenn man dann zum Beispiel auch fremde Feuerwehren [...] im Gemeindegebiet hat.“* (Interview Bamberg II). Da im Fall von Starkregenereignissen die Passierbarkeit von Wegen eine der größten Herausfor-

derungen bei der Bewältigung der Lage darstellt, sollten eingesetzte Standardfahrzeuge zumindest geländefähig sein und über eine Grundausrüstung verfügen, die ihnen einen autarken Einsatz ermöglicht. Dazu zählen insbesondere Stromerzeuger, Tauchpumpe, Beleuchtungssatz und Motorkettensäge. Diese Konzeption, kombiniert mit einem geländegängigen Fahrgestell, wird z. B. bei dem Feuerwehrfahrzeug vom Typ „Löschgruppenfahrzeug für den Katastrophenschutz“ (LF 20 KatS) umgesetzt (SPICZAK-BRZEZINSKI 2019) (vgl. Abbildung 91). Auf diese Weise lässt sich eine eigenständige Abarbeitung der bei Lagen nach Naturereignissen typischerweise vorhandenen Einsatzstellen (Pumparbeiten, Beseitigen von umgestürzten Bäumen u. ä.) selbst bei unvollständiger Besetzung gewährleisten. Darüber hinaus hat sich die Anschaffung von Ersatzkleidung und wassertauglichen Kommunikationsmitteln (Handys, Funkgeräte) als sinnvolle Maßnahme für

den Einsatz bei Starkregen bewährt (vgl. Interview Nordwalde, SCHMITZ-KRÖLL 2020).

An Spezialgerät scheint besonders der Erwerb größerer Pumpen für die Bewältigung bei Starkregenereignissen sinnvoll, da die Feuerwehr hierdurch weniger von der Verfügbarkeit des THW und seiner Gerätschaften abhängig ist, wenn dieses bei vielen zeitgleichen Einsatzstellen mitunter nicht direkt verfügbar ist (vgl. Interview Nordwalde). Im Rahmen der Lageerkundung auch denkbar ist der Einsatz von Drohnen. Diese sind gut geeignet, um auch größere Flächen innerhalb kurzer Zeit aus der Luft zu begutachten. Dabei müssen jedoch bestimmte Voraussetzungen zum Betrieb erfüllt sein (vgl. BBK 2019).

Eine Entlastung von der Anschaffung teurer Spezialausrüstung kann die Inanspruchnahme externer Unterstützungsleistungen darstellen.



Abb. 91: Löschgruppenfahrzeug für den Katastrophenschutz (LF 20 KatS). (Quelle: Wolfgang Tribbels / CM-Foto).

Auch wenn sie eine gewisse Abhängigkeit mit sich bringt und die Leistungen im schlimmsten Fall nicht oder nicht rechtzeitig erfüllt werden können, ist es ratsam, solche externen Unterstützungsmöglichkeiten zu kennen und diese auch jederzeit „auf Zuruf“ anfordern zu können. Neben dem THW können dies z. B. ortsansässige Baufirmen, Landwirte oder kommunale Eigenbetriebe (Baubetriebshöfe, Straßenmeistereien usw.) sein. Wesentlich für eine effektive Unterstützung durch Dritte sind ihre räumliche Nähe sowie ein Überblick darüber, wo welche Geräte mit welcher Kapazität zur Verfügung stehen. Zudem sollten Absprachen, bestenfalls Verträge, mit Verantwortlichen getroffen werden, um die benötigten Ressourcen im Bedarfsfalle zeitnah generieren und zum Einsatz bringen zu können.

8.1.1.3. Vorplanung einer Einsatz- und Führungsstruktur

Um Einsatzlagen nach Starkregenereignissen – aufgrund der Vielzahl paralleler Einsatzstellen in der Regel sogenannte Flächenlagen – effektiv und koordiniert abarbeiten zu können, bedarf es einer sinnvollen und ganzheitlichen Einsatzstruktur. Diese bezieht sich sowohl auf die übergeordnete Führung (Einsatzleitung, Stab) als auch auf die Struktur des Einsatzes darunter. Da der Aufbau einer solchen Struktur inmitten des laufenden Einsatzes und unter dem Druck der Situation sehr fehleranfällig ist, ist eine Vorplanung sehr empfehlenswert. Mit Hilfe dessen lässt sich zudem der Kräftebedarf für eine solche Lage besser abschätzen.

Empfehlungen für die Einsatz- und Führungsorganisation bei Extremwetterereignissen werden z. B. durch MÜLLER (2019) oder OTT et al. (2018) umfassend thematisiert. Im Folgenden soll ein Ansatz nach SCHMITZ-KRÖLL (2020) vorgestellt werden, der angelehnt an das System einer „Besonderen Aufbauorganisation“ (BAO), wie sie auch bei der Polizei üblich ist, entwickelt wurde und aufgrund ihrer Systematik sehr gut auf die Bewältigung von Starkregenereignissen im Katastrophenschutz angewendet werden kann. Hinter dem Ansatz der BAO steht der Gedanke, dass gleich gelagerte Lagen grundsätzlich mit demselben Grundgerüst der Organisation bewältigt

werden können und bei besonderen Einsatzlagen, welche die grundlegende, alltagsausgerichtete Organisationsstruktur – die sogenannte „Allgemeine Aufbauorganisation“ (AAO) – überfordern, dieses Grundgerüst in festgelegte Strukturen aufwachsen kann. In dem Konzept sind die für die jeweilige Situation benötigten Führungsstrukturen und Einsatzabschnitte (EA) mit den darin zu erledigenden Aufträgen festgelegt. Das Konzept beachtet zudem einen voraussichtlich in der Anfangsphase einer besonderen Lage vorhandenen Ressourcenmangel und ist daher zweiphasig aufgebaut: Phase 1 stellt die Aufbauorganisation am Anfang mit den ad hoc aus der Alltagsorganisation zur Verfügung stehenden Kräften dar, während Phase 2 mit Verstärkungskräften rechnet und somit auf das Vorhandensein der bestmöglichen personellen Ausstattung abzielt.

BAO, Phase 1

Bei der Konzeptionierung einer BAO für die erste Phase kann nur mit den unmittelbar verfügbaren Kräften und Einheiten geplant werden. Es wird jedoch bereits hierbei von einem Vollalarm einer Feuerwehr ausgegangen. Während der laufenden Phase 1 werden zudem die Verstärkungskräfte angefordert und herangeführt sowie alle Arbeitsinfrastrukturen aktiviert, die zur Realisierung der in Phase 2 vorgesehenen Strukturen notwendig sind.

Die Einrichtung der Einsatzleitung erfolgt „klassisch“ gemäß der Feuerwehrdienstvorschrift (FwDV) 100, bestehend aus einem Einsatzleiter (EL) und einer unterstützenden Führungseinheit (Führungstrupp/ staffel/ gruppe – je nach personellen Möglichkeiten). Auf die Rolle der Leitstelle (LtS) als sogenannte rückwärtige Führungseinrichtung wird an dieser Stelle nicht weiter eingegangen, ihre Aufgaben in der Vorbereitungsphase werden jedoch in Abschnitt 8.1.2.3 näher ausgeführt.

Der Einsatzleitung werden mehrere Einsatzabschnitte mit jeweils eigenen Abschnittsleitungen untergeordnet, die je nach Ausmaß auch in weitere Unterabschnitte (UA) unterteilt werden können. Sie werden nach örtlichem Bezug oder aufgabenbezogen (z. B. CBRN, Versorgung/Logistik) und möglichst ebenfalls im Vorfeld eingeteilt.

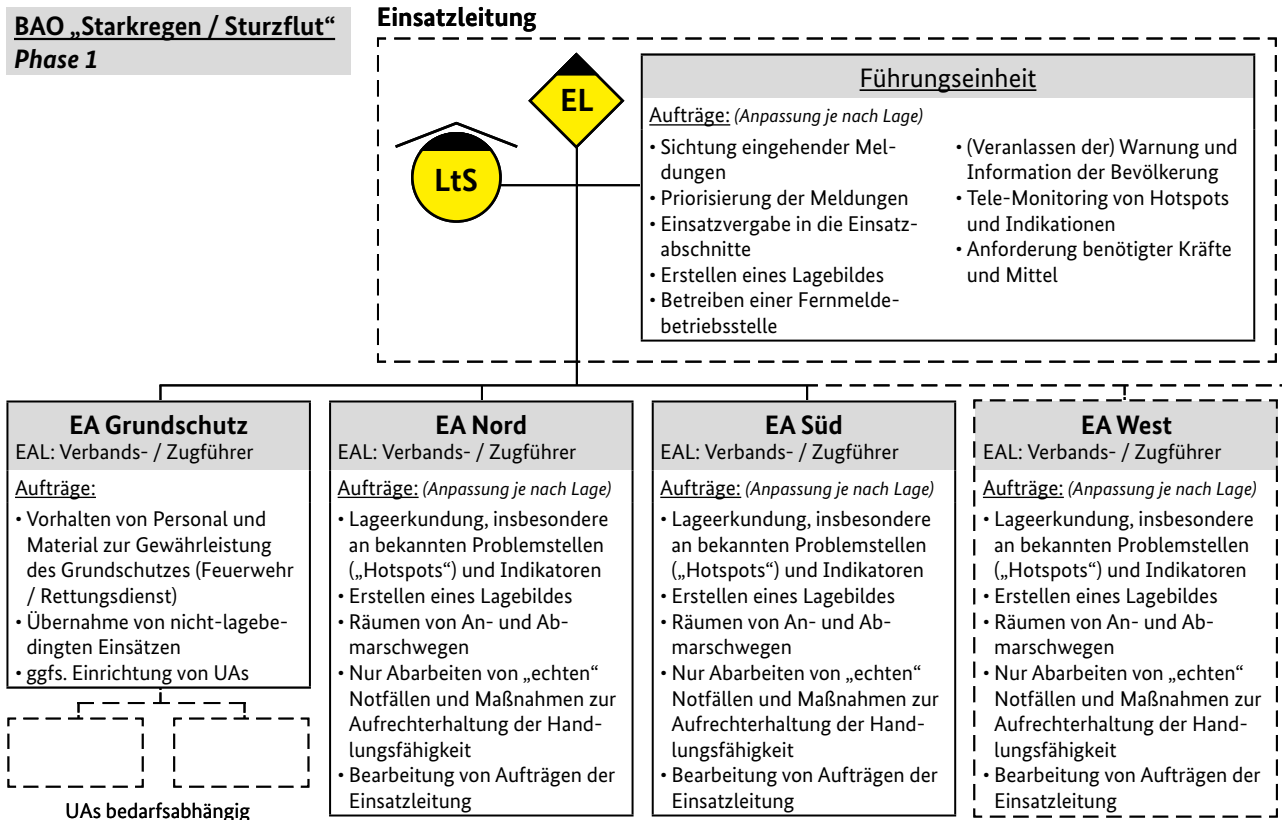


Abb. 92: Vorschlag einer BAO „Starkregen/Sturzflut“, Phase 1 (Quelle: SCHMITZ-KRÖLL 2020, S. 85).

Wenn auch das exakte Gebiet einer Lage im Vorhinein nicht bekannt ist, ist eine Zuweisung von Einheiten und Abschnittsleitungen zu potenziellen Einsatzabschnitten für den Fall eines eintretenden flächenhaften Ereignisses sinnvoll (MÜLLER 2009). Da die EAs häufig nach örtlichen Gegebenheiten gebildet werden, wird hierbei die Verwendung bestehender lokaler Gliederungen vorgeschlagen und beispielhaft in Abbildung 92 dargestellt. So könnten Abschnitte z. B. analog zu primären Ausrückebereichen einzelner Löschzüge gebildet werden. Kräfte für die jeweiligen EAs können sich dann aus ebendiesen Einheiten generieren, die Führung der Abschnitte kann eine Führungskraft aus diesen Reihen (z. B. Zug- oder Verbandsführer) übernehmen. Im Rahmen der Vorplanung der EAs sollte ebenfalls bedacht werden, auf welche Art und Weise die Leitung der

einzelnen EAs erfolgt und wo diese eingerichtet werden soll. Je nach Führungsstufe ergeben sich diesbezüglich unterschiedliche Anforderungen. In jedem Fall bedarf es geeigneter Räumlichkeiten – ortsfeste oder mobile Einrichtungen –, Kommunikationstechnik sowie Mittel zur Darstellung und Dokumentation der Lage.

Die Arbeitsaufträge in den einzelnen EAs sind weitestgehend an die Erkenntnisse der Lageanalysen angelehnt und unterscheiden sich in den nach örtlichen Gegebenheiten definierten Abschnitten prinzipiell nicht voneinander (zu den Aufgaben im Einzelnen siehe Kapitel 8.1.3.2). Nicht vernachlässigt werden darf in jedem Fall ein Einsatzabschnitt, der den Grundschutz der jeweiligen Gebietskörperschaft abdeckt.

Bei der gewählten Darstellung ist zu beachten, dass diese keine starre Organisation impliziert. Es besteht die Möglichkeit, einzelne EAs oder UAs zu streichen oder neue hinzuzufügen. Auch die Einzelaufträge müssen an die jeweilige Situation angepasst werden. Es ist durchaus denkbar, diese Struktur der BAO, Phase 1 auch generell als Aufbauorganisation zur Abarbeitung einer Lage nach einem Starkregen- oder Sturzflutereignis anzuwenden, wenn das Ausmaß der Lage ein Aufwachsen auf die Strukturen der zweiten Phase nicht erfordert. Grundsätzlich sollten aber auch dann in der ersten Phase die benötigten Kräfte und Strukturen zum Übergang in die Phase 2 alarmiert bzw. aktiviert werden.

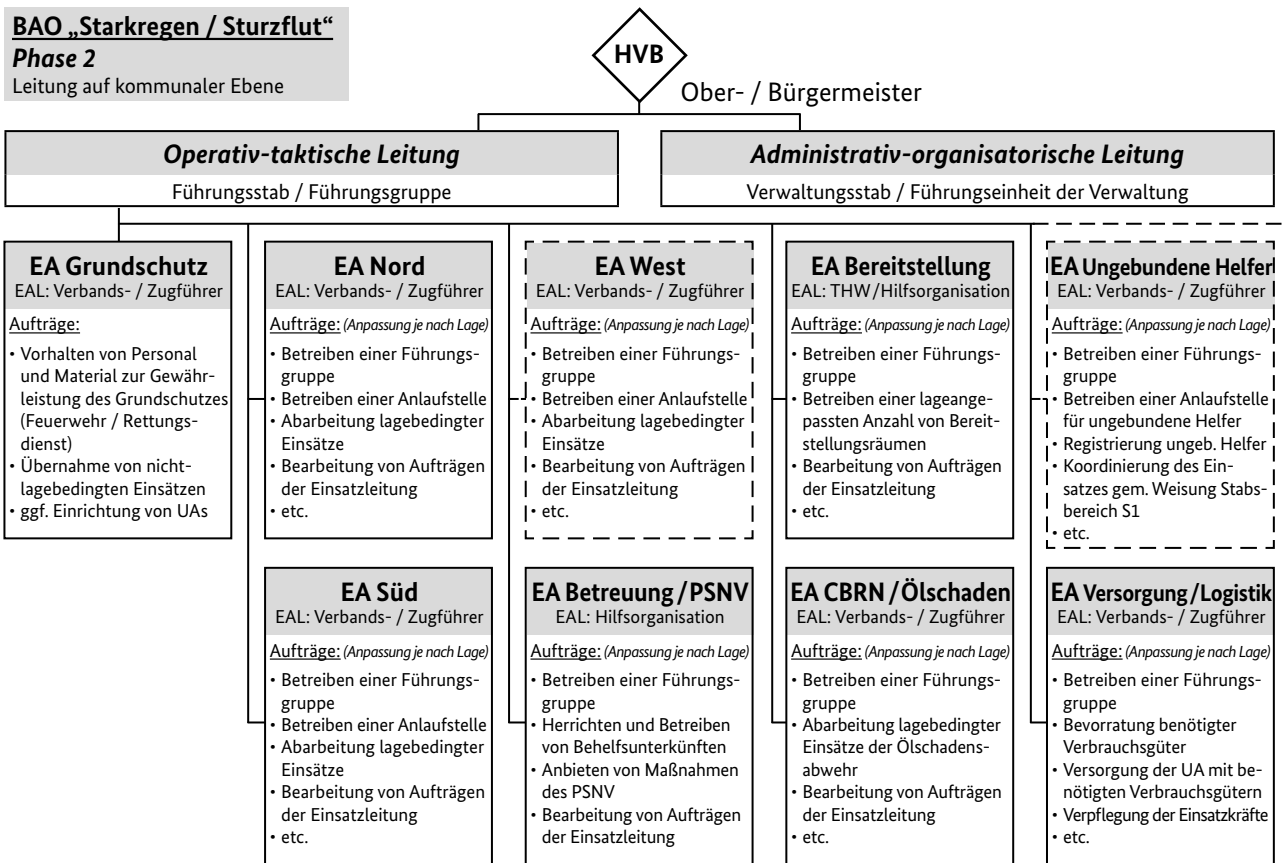
BAO, Phase 2

Nach dem Eintreffen benötigter Verstärkungskräfte und der Ausweitung von Führungsstrukturen lässt sich die Lage nach und nach in ausführlichere und umfangreichere Strukturen überführen. Der größte Unterschied zu Phase 1 besteht im Übergang der Einsatzleitung von einer einsatzleitenden Person im eigentlichen Sinne hin zur Verantwortungsübernahme durch die bzw. den jeweilige/n Hauptverwaltungsbeamtin oder beamteten (HVB), d. h. die Landrätin/den Landrat bzw. (Ober-)Bürgermeister/in. Darunter etablieren sich dann – abhängig davon, ob es sich um eine auf Landkreisebene geführte (Katastrophen-)Lage oder eine auf kommunaler Ebene zu managende Situation (für kreisfreie Städte kann dies auch der Katastrophenfall sein) handelt – eine operativ-taktische Einsatzleitung und eine Verwaltungseinheit für administrativ-organisatorische Belange. Damit ist prinzipiell gewährleistet, dass sowohl Maßnahmen der operativen Gefahrenabwehr als auch Verwaltungsbelange, die bei Lagen nach Starkregenereignissen zu bearbeiten sind, adäquat und aufeinander abgestimmt bewältigt werden können. Immanent wichtig ist hierbei die Überlegung, welche Personen, Funktionen und Einrichtungen in den jeweiligen Organisationsstrukturen enthalten sind und wo diese integriert werden sollen. Dies gilt insbesondere für langwierige Lagen, in denen besondere Handlungsbedarfe auftreten. Konkret seien hierbei Handlungsfelder wie das Social Media-Monitoring oder das Management unge-

bundener Helfender genannt – durch wen sollen diese Aufgaben erledigt werden, wo werden diese Personen oder Teams ein- bzw. angegliedert? Um die o. g. Führungsstrukturen betreiben zu können, bedarf es zudem in quantitativer als auch qualitativer Hinsicht einer adäquaten personellen Ausstattung. Dies gilt auch für den Verwaltungsbereich, in dem Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für den Einsatz in einer Führungsorganisation ausgewählt und beschult werden müssen. Des Weiteren bedarf es Räumlichkeiten, welche die notwendigen technischen Möglichkeiten bieten und dauerhaft für die Stabsarbeit geeignet sind oder zumindest bei Bedarf in kurzer Zeit dafür hergerichtet werden können. Nicht zuletzt muss die Arbeit in den Gremien regelmäßig geübt werden – auch und gerade im Zusammenspiel.

Hinsichtlich der Einsatzabschnitte wird, wie bereits in Phase 1, weiterhin von einer in erster Linie nach örtlichen Gegebenheiten ausgehenden Einteilung ausgegangen. Dabei kann eine Anpassung aber insofern stattfinden, als die Abschnitte der Phase 1 nicht mehr ausschließlich an bestehende Strukturen angelehnt, sondern neu an bestehenden Schadensgebieten ausgerichtet werden. Dies kann mit der Bildung neuer und der Auflösung bestehender EAs einhergehen. Außerdem sollte die Kräfterlage in der zweiten Phase die Einrichtung aufgabenbezogener Abschnitte ermöglichen. Hierbei ist es für die Vorplanung sinnvoll, auch solche Abschnitte zu überdenken, die nicht sehr wahrscheinlich, aber dennoch möglicherweise notwendig werden können, um in einer akuten Situation die Einrichtung eines solchen EA zeitnah bewerkstelligen zu können. Einen Vorschlag für eine solche Strukturierung in Phase 2 zeigt Abbildung 93, die als Anhaltspunkt für die Entwicklung eines eigenen, jeweils auf die individuellen Gegebenheiten einer Gebietskörperschaft abgestimmten Konstrukts dienen kann.

BAO „Starkregen / Sturzflut“
Phase 2
 Leitung auf kommunaler Ebene



BAO „Starkregen / Sturzflut“
Phase 2
 Leitung auf Landkreisebene

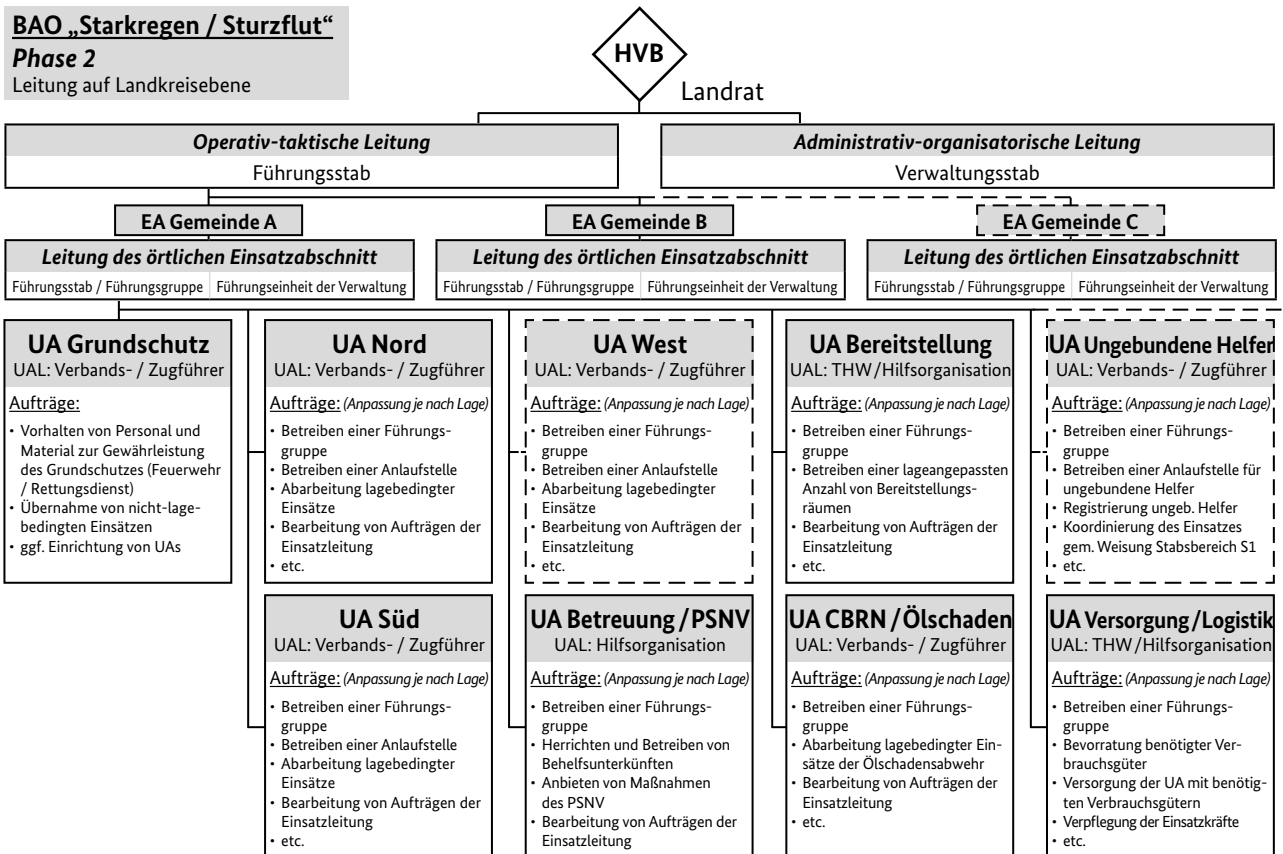


Abb. 93: Vorschlag einer BAO „Starkregen/Sturzflut“, Phase 2; oben: auf kommunaler Ebene im Nichtkatastrophenfall (kreisangehörige Städte) sowie unabhängig davon, ob Katastrophe oder nicht (kreisfreie Städte); unten: auf Landkreisebene, bei Übernahme der Gesamtleitung durch den Landrat (Quelle: SCHMITZ-KrÖLL 2020, S. 86).

8.1.1.4. Effektive Risikokommunikation und Stärkung des Selbstschutzes

Die Risikokommunikation dient dazu, die Bevölkerung im Vorfeld vorhersehbarer Gefahren für eben diese zu sensibilisieren und damit eine Risikomündigkeit zu erzeugen. Menschen sollen demnach in die Lage versetzt werden, informierte Entscheidungen in Bezug auf konkrete Risiken zu treffen und somit sich selbst und ihr Umfeld zu schützen (SCHULZE & LINDEMANN 2020). Diese Fähigkeit des Selbstschutzes einschließlich der Selbsthilfe bis zum Eintreffen qualifizierter Hilfe wird sowohl im Zivilschutz- und Katastrophenhilfegesetz (ZSKG) als auch in der Konzeption Zivile Verteidigung (KZV) als Basisfähigkeit des Zivilschutzes formuliert: Behördliche Maßnahmen ergänzen demnach lediglich die Selbsthilfe der Bevölkerung (§ 1 Abs. 1 ZSKG). Allein von gesetzlicher Seite aus erhält die Risikokommunikation mit dem Ziel der Erhöhung des Selbstschutzes demnach einen überaus hohen Stellenwert. Zudem bildet sie die Basis für eine wirksame Krisenkommunikation im Ernstfall (GEENEN 2017a).

Vonseiten aller Interviewpartner wurde dem Risikobewusstsein der Bevölkerung einhergehend mit einem guten Informationsgrad ein hoher bis sehr hoher Einfluss auf die Entstehung von Einsätzen beigemessen: Wer gut über Risiken informiert ist und diese Information auch in entsprechende Vorsorge- und Selbsthilfemaßnahmen umsetzen kann, trägt also im Ereignisfall dazu bei, Einsatzstellen zu vermeiden. Das individuelle Risikobewusstsein wird dabei sowohl von äußeren als auch von persönlichen Faktoren beeinflusst. Wer beispielsweise in der Vergangenheit schon einmal selbst direkt mit den Auswirkungen eines Unwetterereignisses konfrontiert war, entwickelt in der Folge ein stärkeres Bewusstsein für mögliche damit einhergehende Gefahren. Ebenso spielen demografische Aspekte eine Rolle. Beispielsweise werden die aktuellen Veränderungen in der Altersstruktur mit einem steigenden Sicherheitsbedürfnis in Verbindung gebracht (HERTLER & WARNER 2011), das sich zusammen mit einer geringeren Selbsthilfefähigkeit – so die Wahrnehmung – bereits heute in einer höheren Zahl von Notrufen und daraus resultierenden Einsätzen

niederschlägt: „Die Hemmschwelle, die Feuerwehr zu rufen, ist geringer geworden“ (Interview Bamberg II, vgl. auch KUTSCHKER 2018). In einer der Fallanalysen nach SCHMITZ-KRÖLL 2020 stellten sich 95 % der Anrufe im Nachhinein als entbehrlich heraus, da diese keinen Notruf im eigentlichen Sinne enthielten, ein Einsatz der Feuerwehr also tatsächlich nicht (dringend) erforderlich war.

Zugleich trägt ein generell erhöhtes Bewusstsein bezüglich des stattfindenden Klimawandels dazu bei, die Risikowahrnehmung in Bezug auf damit im Zusammenhang stehende Einzereignisse zu stärken: „Also mit dem Klimawandel, der immer mehr ins Bewusstsein rückt, hat man auch ein Risikobewusstsein entwickelt. Und jetzt rufen auch Leute an und fragen direkt, wie sie sich vorbereiten können gegen Starkregen.“ (Interview Potsdam) Die mediale Aufbereitung besonders schadensträchtiger Ereignisse dürfte diese beobachtete Entwicklung zusätzlich unterstützen. Auch ein hohes Risikobewusstsein trägt jedoch noch nicht zwangsläufig dazu bei, dass Vorsorge- und Selbsthilfemaßnahmen ergriffen werden (ZEHNER 2020). In der Bereitschaft und Fähigkeit zur Selbsthilfe lassen sich zum Teil deutliche Unterschiede feststellen: „Es gibt Leute, die rufen an, weil sie fünf Zentimeter Wasser haben und die machen nichts, die nehmen keinen Putzeimer, die nehmen auch keinen Lappen in die Hand. [...] Und es gibt Leute, die stehen – ja – 20, 30, 40 Zentimeter unter Wasser und machen selber das ganze Zeug“ (Interview Bamberg II). KUTSCHKER (2018) stellt dabei fest, dass sich das Vorsorgeverhalten vieler Bürgerinnen und Bürger trotz wiederholter Betroffenheit und hoher Sachschäden nicht oder kaum verändere.

Aus den genannten Beobachtungen lässt sich der Schluss ziehen, dass es sich bei der Risikokommunikation und Stärkung des Selbstschutzes um zentrale Maßnahmen handelt, um das Notrufaufkommen bei einem Starkregenereignis deutlich zu verringern und damit die operativen Einrichtungen substanziell zu entlasten. Dementsprechend hoch sollte der Stellenwert sein, der einer effektiven Risikokommunikation beigemessen wird. Hierfür lassen sich einige Grundsätze formulieren:

1. **Risikokommunikation muss alle Teile der Bevölkerung erreichen:** Hiermit ist zum einen die physische Erreichbarkeit in Form unterschiedlicher Informationskanäle als auch die psychische Erreichbarkeit durch eine den individuellen Lebenslagen, Sorgen, Wissensständen und Handlungsmöglichkeiten gegenüber angemessene Kommunikationsweise gemeint. Eine der wesentlichen Empfehlungen hierbei lautet, die Bürgerinnen und Bürger frühzeitig, umfassend und transparent in einen „Dialog auf Augenhöhe“ einzubinden, da dieser eine wichtige Funktion bei der Bildung eines auch in der Krise tragfähigen Vertrauensverhältnisses zwischen Bürgern und staatlichen Stellen einnimmt (GEENEN 2017a). Auf dieser Grundlage könne der Bürger am ehesten zu einem eigenen Urteil bezüglich Risiken gelangen. Regelmäßige sowie anlassbezogene Informations- und Dialogveranstaltungen, aber auch Möglichkeiten zur partizipativen Beteiligung an Planungsprozessen stellen demnach geeignete und effektive Mittel der Risikokommunikation dar. Parallel sollte auch weiterhin die unidirektionale Übermittlung von Informationen (vom Sender zum Empfänger) seitens zuständiger Verwaltungen über herkömmliche Kanäle, d. h. Radio, Printmedien und Fernsehen, sowie verstärkt auch über die digitalen Medien erfolgen, um möglichst alle Teile der Bevölkerung zu erreichen. Die Informationen sollten dabei sachlich, verständlich und alltagsnah gestaltet sein und Empfehlungen sich an den Bedarfen verschiedener Bevölkerungsgruppen orientieren (ZEHNER 2020). Dies schließt auch Einrichtungen Kritischer Infra-
- struktur ein, deren Funktionsfähigkeit gerade im Krisenfall entscheidend ist, um weitere negative Effekte zu vermeiden.
2. **Risikokommunikation muss nicht nur informieren, sondern auch zur Übernahme von Eigenverantwortung motivieren:** Die alleinige Bereitstellung von Informationen reicht in den meisten Fällen nicht aus, um entsprechende Handlungen auszulösen (SCHULZE & LINDEMANN 2020). Entscheidend ist, dass hieraus auch die Bereitschaft erwächst, „für sich selbst Verantwortung zu übernehmen und die dafür notwendigen Fähigkeiten zu erlernen“ (ebd.). Dafür sollten neben bloßem Wissen auch ganz konkrete Fertigkeiten vermittelt werden – je konkreter die Empfehlungen, desto leichter fällt in der Regel auch ihre Umsetzung. Zudem können partizipative Ansätze die aktive Auseinandersetzung mit Risiken und Vorsorgemaßnahmen fördern. Verschiedene Kommunen laden beispielsweise in Projekten zum klimaresilienten Stadtumbau ihre Bürgerinnen und Bürger dazu ein, gemeinsam Lösungsansätze zur Anpassung an den Klimawandel zu finden. Auch wird durch das Quartiersmanagement vielerorts auf die Förderung von Nachbarschaftsnetzwerken gesetzt, die neben der Aktivierung von Bewusstseinsbildung und Vorsorgebemühungen im Krisenfall auch einen ganz praktischen Nutzen erfüllen können (ZEHNER 2020). Das sogenannte „Freiwilligen-vor-Ort-System“ (FvOS) als organisierte Form der Nachbarschaftshilfe bis zum Eintreffen professioneller Hilfe stellt ein Beispiel für einen Erfolg versprechenden Ansatz dar (TEPPE 2020).
3. **Risikokommunikation muss vor und nach einer Krise erfolgen:** Wenngleich der Risikokommunikation zumeist eher eine präventive Bedeutung beigemessen wird, ist die nachbereitende Risikokommunikation im Anschluss an eine Krise nicht minder wichtig. Ein erlebtes Unwetterereignis wirft in der Bevölkerung in der Regel viele Fragen auf: Was hat zu den entstandenen Schäden geführt? Was haben die verschiedenen Akteure unternommen, um die Schäden einzugrenzen oder zu beheben? Was könnte im Hinblick auf zukünftige Ereignisse noch besser laufen? Wie kann die

Bevölkerung selbst dazu beitragen? Um diese Fragen an die richtigen Stellen adressieren zu können, bietet sich auch im Nachgang eines Ereignisses eine Dialogveranstaltung an (vgl. Kapitel 8.1.4). Die (kritische) Evaluation der in der Krise getroffenen Maßnahmen kann wiederum als Basis für die Optimierung bestehender und Entwicklung neuer (Kommunikations-)Strategien herangezogen werden.

Im gesonderten Hinblick auf Starkregen sollten bei der Informationsvermittlung auch die Genese und die Besonderheiten dieses Ereignistyps verdeutlicht werden. Auch ohne meteorologische Detailspekte vertiefen zu müssen, sollte stärker als bisher zwischen fluvialem und pluvialem Hochwasser differenziert werden. Nach SCHMITZ-KRÖLL (2020) erfolgt in der Bevölkerung so gut wie keine Unterscheidung zwischen Flusshochwasser (fluvial) – gemeinhin schlicht als „Hochwasser“ bezeichnet – und Überflutungen, die durch Starkregen und Sturzfluten zustande kommen (pluvial). Eine solche Differenzierung wird auch in Ratgebern zur Vorsorge gegenüber Hochwasser oftmals vernachlässigt. Die beiden Überflutungsarten gehen jedoch mit unterschiedlichen Erscheinungsformen einher, die wiederum differenzierte Verhaltensweisen erfordern. Ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal stellt beispielsweise die verbleibende Vorbereitungszeit dar: Während sich Flusshochwässer mit einigem Vorlauf ankündigen, treffen Starkregenereignisse die Kommunen und ihre Bewohner oft völlig überraschend und unvorbereitet. Außerdem ist damit zu rechnen, dass diese Ereignisse prinzipiell an jedem Ort auch unabhängig von den geografischen Gegebenheiten auftreten können. Auf die speziellen Gefahren, die von Starkregen und Sturzfluten ausgehen können, sollte demnach im Rahmen der Risikokommunikation ausdrücklich hingewiesen werden. Ergänzt werden sollten diese Informationen durch Hinweise zu situationsangemessenem Verhalten. Ratgeber und Internetseiten konzentrieren sich in ihren Empfehlungen zur Vorsorge meist auf die bauliche und technische Vorsorge sowie den Abschluss eines adäquaten Versicherungsschutzes. Die Verhaltensvorsorge findet dagegen kaum oder keine Berücksichtigung, obwohl sie – wie vergangene

Ereignisse gezeigt haben – ganz entscheidend sein kann, um Todesfälle zu vermeiden. Sie sollte entsprechend nachdrücklich im Rahmen der Risikokommunikation thematisiert werden (für konkrete Vorschläge vgl. z. B. BBK 2020).

8.1.1.5. Stärkere Verankerung des Themas in Übungen, Aus- und Fortbildung

Die Frage, ob es für die Vorbereitung auf und die Bewältigung von Einsatzlagen infolge von Starkregenereignissen einer gesonderten Übung oder Ausbildung bedarf, wurde von den Interviewpartnern unterschiedlich beantwortet. Einerseits wurde bemerkt, dass sich das einsatztaktische Vorgehen nicht grundlegend von anderen Lagen unterscheidet: *„Es gibt gewisse Faktoren, auf die man achten muss – [...] vorsichtig reingehen ist noch irgendwie [wichtig], ist da noch irgendwo Strom drauf oder sind da noch Personen in Gefahr oder so. Aber das hat man bei anderen Einsätzen auch.“* (Interview Nordwalde) Es komme, wie es auch im Rahmen der Befragung mehrfach geschildert wurde, mehr auf die Wirkung an als auf deren Ursache: *„Ob jetzt ein Wasserrohrbruch in 'nem Haus passiert oder von außen das Wasser reingelaufen ist, das ändert überhaupt nichts an dem, was man als Einsatzkraft tut.“* (Interview Aachen, WISCHOTT 2020). Ab einem gewissen Dienstgrad wird zudem eine Erfahrung mit den Besonderheiten solcher Ereignisse vorausgesetzt, weil es unter anderem Teil der Führungsausbildung sei, *„dass man lernt, vollgelaufene Keller leer zu pumpen und worauf man achten muss“* (Interview Potsdam). Demgegenüber wird aus Sicht der Leitstelle der Übung von Flächen- und Sonderlagen eine *„ganz entscheidende“* Bedeutung beigemessen und *„einmal im Jahr [...] jeder Disponent in einem Falltraining auf diese Flächen- und Sonderlagenkonzepte ausgebildet“* (Interview Bamberg). Neben der Bedienung der Einsatzleitsoftware ginge es dabei unter anderem um die Zusammenarbeit untereinander sowie mit den Feuerwehren und um das Durchspielen der verschiedenen im Einsatz relevanten Kommunikationswege.

Im 2. Monitoringbericht zur DAS wird dem Thema Übung ebenfalls eine hohe Bedeutung beigemessen, gleichzeitig aber betont, dass *„ein spezieller Klimabezug der Übungen [...] keine*

Voraussetzung [sei], um sich auf Klimawandelfolgen vorzubereiten, denn die möglichen Ereignisse werden nicht grundsätzlich anders geartet sein als bisher. [...] Neue Anforderungen können vor allem daraus entstehen, dass diese Ereignisse zukünftig häufiger und intensiver auftreten und sich möglicherweise auch in zunehmendem Maße zeitlich überlagern“ (UBA 2019, S. 240). Nach der bereits weiter oben erwähnten Befragung unter Einsatzorganisationen, die im Jahr 2011 vom BBK durchgeführt wurde, wird zumindest noch Anpassungsbedarf im Bereich der Schulung und Ausbildung in Bezug auf klimawandelbezogene Ereignisse gesehen (31 Nennungen; BBK 2019b). Weitere, im Verlauf des Projekts geführte informelle Gespräche mit Einsatz- und Führungskräften bestätigen diese Aussage. Geübt werde etwa zu oft nur die allgemeine Flächenlage, ohne dabei ein konkretes Szenario durchzuspielen. Insbesondere das Thema Starkregen scheint dabei gegenüber Einsatzlagen, die durch Flusshochwasser ausgelöst werden, zu kurz zu kommen, obwohl sich erstere in vielen Punkten markant von letzteren unterscheiden. SCHMITZ-KRÖLL (2020) betont zudem, dass es insbesondere eines genügend gut – insbesondere für die Stabsarbeit – ausgebildeten Führungspersonals bedarf, da die Lagen oftmals lange andauern und nur dadurch eine regelmäßige Ablösung und Entlastung auch in den Entscheidungspositionen gewährleistet werden könne.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass spezifische, auf Starkregenereignisse bezogene Übungs- und Ausbildungsinhalte weniger für die Einsatzkräfte als vielmehr für Personen mit Entscheidungsbefugnis von Bedeutung sein können. Zum einen sind dies Inhalte, die auch unabhängig von dem konkreten Szenario einen positiven Effekt entfalten. Hierbei ist vor allem die organisationsübergreifende Kommunikation und Koordination zu nennen, die bereits bei der Übung bestenfalls alle bei einem Ereignis beteiligten Akteure – Leitstellen, Feuerwehren, THW und Hilfsorganisationen, unterschiedliche Fachbereiche von Kommunal- und Kreisverwaltungen, aber auch potenziell betroffene Betreiber Kritischer Infrastrukturen – einschließt. Zum anderen sollten jedoch auch Inhalte vermittelt werden, die

speziell auf die Bewältigung von Starkregenereignissen ausgelegt sind. Besonders die Anzahl der bei einem solchen Starkregenereignis oft zeitgleich auftretenden Einsatzstellen ist nicht ohne Weiteres mit anderen Lagen vergleichbar und macht daher eine gesonderte Planung erforderlich, die eine effektivere Bewältigung erlaubt (vgl. z. B. Kapitel 8.1.1.3).

8.1.1.6. Aufbau von Netzwerken

Auf die Frage hin, was bei der Ereignisbewältigung gut gelaufen sei, wurde seitens der Interviewpartner immer wieder die Bedeutung bestehender Netzwerke betont, die während der Lage tragfähig genug seien, um das Ereignis gemeinsam im Rahmen der Möglichkeiten zu bewältigen: *„Also die Zusammenarbeit lief ganz gut oder sehr gut eigentlich, Feuerwehr, Verwaltung, sachkundige Bürger, die anderen Hilfsorganisationen, also man ist immer irgendwie im selben Thema drin und man kennt sich auch persönlich dann und das funktioniert.“* (Interview Nordwalde) Die hierin zum Ausdruck kommenden „kurzen Wege“ mögen ein Vorteil kleinerer Kommunen sein, können aber ebenso in größeren Kommunen durch entsprechende Netzbildung entstehen und genutzt werden (vgl. auch Interview Bamberg). Die Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) empfiehlt in ihrer Strategie zum Starkregenrisikomanagement sowohl die innerkommunale als auch die interkommunale Netzbildung (LAWA 2018). Die innerkommunale Vorsorge gegenüber Überflutungen durch Starkregen erfordere „einen intensiven Austausch zwischen allen beteiligten Akteuren (z. B. Politik, Forst- und Landwirtschaft, Fachplaner, betroffene Bürgerinnen und Bürger, Rettungs- und Einsatzkräfte des Katastrophenschutzes) sowie eine enge verwaltungsinterne Abstimmung zwischen den kommunalen Fachämtern (Stadtplanungsamt, Straßenbauamt, Umweltamt, Stadtentwässerung, Ordnungsamt usw.)“ (ebd., S. 49, vgl. auch Abbildung 94). Es wird empfohlen, dass ein solcher Austausch insbesondere bei größeren Kommunen von einer zentralen Stelle koordiniert werden sollte.



Abb. 94: Übersicht über wichtige beteiligte Akteure im Starkregenrisikomanagement (Quelle: nach LAWA 2018, S. 26).

Im Rahmen der Dialogveranstaltung mit den Kommunen wurde zudem ein hoher Bedarf nach einem kommunenübergreifenden Erfahrungsaustausch deutlich. Unter dem Leitsatz, „das Rad nicht immer wieder neu erfinden zu müssen“, kann sich sowohl der Austausch zu erlebten Gefahrensituationen und Schäden als auch zu implementierten, wirksamen Maßnahmen beiderseitig gewinnbringend entfalten. Dabei sind Informations- und Netzwerkveranstaltungen ebenso denkbar wie ein verstetigter Kreis sich regelmäßig untereinander austauschender Personen. Für den Bereich der Gefahrenabwehr könnte sich dieser beispielsweise auch aus bereits bestehenden Gremien und Verbänden wie der Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren (AGBF) oder dem Deutschen Feuerwehrverband (DFV) formieren.

Neben dem reinen Austausch kann auch die Organisation von Partnerschaften mit Nachbarkommunen jenseits der überörtlichen Hilfe einen

Mehrwert für die Vorbereitung auf und die Bewältigung von Ereignissen bieten. Dies kann sich z. B. auf die gemeinsame Nutzung von Material- und Personalressourcen, Bildung gemeinsamer Facheinheiten oder Durchführung gemeinsamer Seminare und Übungen beziehen (vgl. THIELE & KRAUCH 2019).

Wie auch immer die inner- und interkommunalen Zusammenschlüsse im Einzelnen aussehen – für einen erfolgreichen Umgang mit Starkregen sind sie essenziell und sollten bei allen ergriffenen Maßnahmen mit an vorderster Stelle stehen.

8.1.1.7. Systematische Erfassung starkregenbedingter Einsätze

Der Untersuchung angewandter Dokumentationsverfahren für unwetterbedingte Einsätze kam im Projekt eine entscheidende Bedeutung zu. Nicht nur entscheiden Art und Güte der Einsatzdokumentation darüber, inwieweit sich Einsatzdaten mit Wetterdaten – in diesem Fall Nieder-

schlagsdaten – in Verbindung bringen lassen und hierüber z. B. Hinweise auf lokale Einsatzschwerpunkte erlauben. Auch bildet eine systematische Einsatzerfassung im Zusammenhang mit Extremwetterereignissen die Voraussetzung für eine Vergleichbarkeit der Einsatzfähigkeit bzw. -belastung durch einen bestimmten Ereignistyp, sowohl innerhalb einer als auch zwischen verschiedenen Kommunen. Innerhalb einer Kommune erlaubt sie es, einen möglichen Trend in der Einsatzhäufigkeit über die Jahre zu erkennen. Insbesondere vor dem Hintergrund des Klimawandels und einer erwarteten Zunahme der Häufigkeit und Intensität extremer Wetterereignisse kann eine solche Beobachtung entscheidende Hinweise auf möglicherweise notwendige Anpassungsmaßnahmen, etwa hinsichtlich der personellen Aufstellung, geben (vgl. auch BBK 2019b).

Damit die bei einem Einsatz erfassten Daten diese Auswertungen ermöglichen, müssen sie bestimmte Voraussetzungen erfüllen. Dazu zählen beispielsweise eine eindeutige Zuordnungsmöglichkeit der Einträge zur Einsatzursache Extremwetter oder eine weitestgehend einheitliche und somit Medienbruchfreie Dokumentationsform über einen gewissen Zeitraum (vgl. Kap 6.1). Gegenwärtig liegen diese Anforderungen nur bei einem Teil der in Deutschland erfassten Feuerwehreinsätze vor. Aus diesem Grund sollen im Folgenden Ansätze zu einer Weiterentwicklung der Einsatzerfassung formuliert werden, die der statistischen Auswertbarkeit von Einsatzdaten im Hinblick auf extreme Wetterereignisse zugutekämen

Den Vorschlägen liegen die folgenden Beobachtungen zugrunde:

1. **Die Heterogenität der derzeit in Deutschland angewandten Erfassungsmethoden von Feuerwehreinsätzen erschwert eine übergreifende Auswertung der Einsatzdaten im Hinblick auf klimatologische Entwicklungen:** Ungenauigkeiten und Unterschiede bspw. in den verwendeten Einsatzstichworten oder in der Auslegung des Einsatzbegriffs machen eine vergleichende Analyse zum Teil sehr aufwendig und limitieren ihre Aussagekraft (vgl. Kapitel 6 und 7.1).
2. **Einige Einsatzinformationen werden bereits in vergleichbarer Weise erhoben:** Trotz der benannten Unterschiede ähneln sich die erfassten Einsatzinformationen in vielen Punkten (vgl. Kapitel 6.1). Auf diesen Gemeinsamkeiten könnte eine mögliche Weiterentwicklung aufbauen.
3. **Die operativen Einrichtungen stehen der Thematik grundsätzlich offen gegenüber:** Ausgehend von den zahlreichen positiven Rückmeldungen auf das KlamEx-Projekt seitens der operativen Einrichtungen (u. a. im Rahmen des Fragebogens) kann auf dieser Ebene ein hohes Interesse an Starkregen bzw. Extremwetterereignissen im Allgemeinen und ihren Auswirkungen auf das Einsatzgeschehen angenommen werden. Dem BBK zur Verfügung gestellte Auswertungen, die einige Kommunen basierend auf ihren Einsatzdaten zur Beobachtung der eigenen Einsatzentwicklung im Hinblick auf Extremwetterereignisse durchführen, verdeutlichen zudem den Bedarf, die eigenen Daten für eine Art Monitoring verwenden zu können.
4. **Landesweite Vorgaben für die Erfassung von Feuerwehreinsätzen bilden eine Ausnahme:** Während viele der Rettungsdienstgesetze auch Dokumentationspflichten enthalten, ist dies bei den Landeskatastrophenschutzgesetzen nicht der Fall. Vereinzelt wurden jedoch zusätzliche Verordnungen erlassen, die Vorgaben für die Einsatzdokumentation im Katastrophenschutz, bspw. mit dem Ziel der Erstellung von (Landes-)Statistiken oder Nutzung der Informationen für Planungs- und Verwaltungszwecke, beinhalten.

Relevanz/Vorteile einer vergleichbaren Einsatz- erfassung verdeutlichen

Die Vorteile einer vergleichbaren Erfassung von (unwetterbedingten) Feuerwehreinsätzen kommen potenziell auf allen administrativen Ebenen zum Tragen:

- Aus kommunaler Sicht/Sicht von Einsatzorganisationen kann eine vergleichbar geregelte Einsatzfassung eine Orientierungshilfe für die eigene Einsatzfassung und damit ein größeres Maß an Handlungssicherheit für alle mit der Dokumentation zusammenhängenden Bereiche bieten. Dazu zählen bspw. die Abrechnung kostenpflichtiger Einsätze, die Rechtssicherheit der dokumentierten Einsatztätigkeit und in der Lage auch die Priorisierung eingehender Meldungen. Darüber hinaus können aus soliden Daten eventuelle Überlastungen und Bedarfe, etwa im Hinblick auf die Feuerwehrbedarfsplanung, leichter erkannt werden.
- Aus Landessicht kann eine vergleichbar geregelte Einsatzfassung die Auswertbarkeit von Rückmeldungen aus den einzelnen Kommunen und damit einen Gesamtüberblick über Leistungen, Kapazitäten und Grenzen der landeszugehörigen Gefahrenabwehr (nicht nur, aber auch im Hinblick auf die Bewältigung von Extremwetterereignissen) erleichtern. Damit einher geht die vereinfachte Erstellung von Statistiken und die Ableitung wirkungsvoller Anpassungsmaßnahmen für den Katastrophenschutz, die entsprechend nachweisbarer und bis auf die kommunale Ebene differenzierter Bedarfe erfolgen kann.
- Aus Bundessicht könnte eine vergleichbar geregelte Einsatzfassung ein über die derzeit ausschließlich verwendeten Einsatzdaten des THW hinausgehendes, quantitativ gestütztes Monitoring der Auswirkungen des Klimawandels auf den Bevölkerungsschutz ermöglichen, sofern dies von den übrigen Verwaltungsebenen gewünscht ist und durch die Aufbereitung und Bereitstellung entsprechender Einsatzdaten für die Analyse unterstützt würde.

Neben den genannten positiven Aspekten gilt es auch Herausforderungen bei der Findung von Regelungen, die für einen größeren administrativen Raum gelten sollen, zu thematisieren. Darunter ist z. B. die hinreichende Berücksichtigung regionaler oder lokaler Besonderheiten in der Einsatzabwicklung, die zum Teil über Jahre gewachsene Strukturen widerspiegeln und von einer eventuellen Neuregelung nicht übergangen werden dürften. Für die Identifikation solcher Hemmnisse und die Entwicklung angemessener Lösungen bedarf es ganz besonders des auch weiter unten als Maßnahme formulierten institutionenübergreifenden Austauschs.

Gemeinsames Verständnis des Einsatzbegriffs herbeiführen

Die Befragungsergebnisse haben ebenso wie die Auswertung zur Verfügung gestellter Einsatzdatensätze die Annahme bestätigt, dass sich hinter dem Begriff bzw. der Zählung eines Einsatzes mehrere unterschiedliche Auslegungen verbergen. Mehrheitlich ist damit eine Einsatzstelle mit allen dazugehörigen Ausrückeinheiten gemeint, zum Teil wird aber auch jede ausrückende Einheit als separater Einsatz vermerkt oder es werden im Gegenteil alle Einsatzstellen und Einheiten unter einem Einsatz(-bericht) subsummiert. Selbst wenn es ein zugrunde liegendes gemeinsames Verständnis des Einsatzbegriffs geben sollte, kommt dieses als solches in den unterschiedlich gelagerten Formen der Einsatzdokumentation nicht zum Ausdruck. Eine einheitliche Begriffsauslegung ist jedoch grundlegend für die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Datensätze, etwa für Angaben zur Einsatzhäufigkeit.

Die Ursachen für die unterschiedlichen Auslegungen sind vielfältig (vgl. Kapitel 6.1), sodass eine mögliche Festlegung auf eine Variante diese Realitäten berücksichtigen muss. Zu nennen ist hierbei beispielsweise die Dokumentationsform, die bei händischer Erfassung tendenziell eher die summarische Registrierung „eines Einsatzes“ bedingt, als dies bei der elektronischen Erfassung der Fall ist. Auch unterschiedliche Vorgaben der Einsatzleitsysteme tragen zum Anlegen neuer Einsätze nach unterschiedlichen Standards bei. Insofern kann eine Angleichung des Begriffsverständnis-

ses kaum ohne zeitgleiche Anpassungen in den als ursächlich identifizierten Bereichen erfolgen oder ist erst über diese überhaupt möglich, da sie die Verwendung bestimmter Begriffsvarianten entscheidend mitbestimmen.

Solange eine Anpassung in diesen Bereichen nicht möglich ist, gilt es zu überlegen, welche Begriffsvariante sich dennoch gut von möglichst vielen Leitstellen und Einsatzorganisationen anwenden ließe. Ein erster Schritt könnte in einem gemeinsamen Brainstorming über Vor- und Nachteile sowie Praktikabilität der jeweiligen Auslegungsarten bestehen. Wenn sich eine Präferenz für eine Variante herausgebildet hat, kann diese nachfolgend nach Möglichkeit in allen davon tangierten Bereichen (Eingabesysteme, Alarmierungsplanungen, Einsatzformulare) implementiert werden.

Gemeinsame Erhebungsmerkmale und -kategorien definieren, darunter separate Kategorien für Unwetter

Über größere administrative Räume einheitlich festgelegte Erhebungsmerkmale bilden bisher noch die Ausnahme in den Ländern. Im Fall Thüringens wurden sie im Jahr 2017 eingeführt, um „das Einsatzgeschehen sowie den Aufbau, die Ausrüstung und personelle Ausstattung der Feuerwehren in Thüringen [zu] dokumentieren. Alle Daten werden in einer Geschäftsstatistik erfasst“ (ThürBrandStatVO). Die zu erfassenden Erhebungsmerkmale der Brand- und Hilfeleistungstatistik sind verpflichtend in regelmäßigen Zeiträumen von den Aufgabenträgern mithilfe einer gesonderten Webanwendung an das Landesamt für Statistik zu übermitteln. Über die Landesvorgabe wird also sichergestellt, dass landesweit mindestens die vorgegebenen Informationen von jeder Einrichtung erfasst werden und dadurch eine grundlegende Vergleichbarkeit in den Einsatzdaten gegeben ist.

Ungeachtet vorhandener oder nicht vorhandener Vorgaben ähneln sich die erfassten Einsatzinformationen in den Kommunen, die an der Befragung teilnahmen, bis zu einem gewissen Grad. Einsatzart, Einsatzursache und Einsatzdauer etwa werden von nahezu allen Einrichtungen dokumentiert (vgl. Kapitel 6.1). Hinsichtlich der räum-

lichen Auflösung der Angaben zum Einsatzort zeigt sich dagegen ein heterogenes Bild. Auch bei der Aufschlüsselung der einzelnen Erfassungskategorien gibt es große Unterschiede, insbesondere hinsichtlich der Kategorisierung der Einsatzursache. Eine eindeutige Zuordnung zum Einsatzauslöser Extremwetter ist in vielen Fällen nicht möglich, da die Einsatzstichworte zu allgemein gehalten sind (z. B. „Technische Hilfe“, „Wasser“) oder verschiedene Einsatzursachen in ein und demselben Stichwort zusammengeführt werden (z. B. „Sturm/Wasser“). Um jedoch Auswirkungen des Klimawandels auf das Einsatzgeschehen im Sinne eines Monitorings über längere Zeiträume beobachten und mögliche Veränderungen feststellen zu können, bedarf es bei der Ursachenbeschreibung einer genaueren Differenzierung nach klimatischen bzw. wetterbedingten Einsatzursachen. In einigen Kommunen wurden vermutlich aufgrund der wahrgenommenen Häufung unwetterbedingter Einsätze bereits entsprechende allgemeine („Unwetter“) oder differenzierte Kategorien („Überflutung/Starkregen“) eingeführt.

Aus den genannten Gegebenheiten leitet sich der Vorschlag ab, sich – wiederum im gemeinsamen Austausch (vgl. dazu weiter unten) – auf eine Auswahl an Kernmerkmalen und -kategorien zu verständigen, die für eine vergleichende Auswertung mehr oder minder zwingend gegeben sein müssten. Aus der Erfahrung mit der gemeinsamen Auswertung von Einsatz- und Wetterdaten wurde beispielhaft eine Auswahl für mögliche Kernmerkmale getroffen, die für eine solche Analyse als unbedingt notwendig (blau), hilfreich für detailliertere Aussagen (blau-grau) und optional (grau) zu bewerten sind (vgl. Tabelle 16).

Datum	Land	Kreis	Gmde. (Stadtteil)	Straße (Hausnr., Koordinaten)	Einsatzbeginn (Uhrzeit)	Einsatzende (Uhrzeit)	Einsatzursache/ Klassifikation	Einsatzdauer (Einsatzstunden)	Einsatzkräfte (und -mittel)	Freitext

Tab. 16: Vorschlag für ein Kernset an Erhebungsmerkmalen für eine gemeinsame Auswertung von Einsatz- und Wetterdaten. Blau gekennzeichnete Merkmale werden als unbedingt notwendig eingestuft, blau-graue Merkmale als hilfreich für detaillierte Aussagen und graue Merkmale als optional.

Demnach sind für eine Zuordnung von Einsatzdaten zu meteorologischen Ereignissen Angaben zu Datum und Uhrzeit des Einsatzbeginns sowie eine möglichst genaue Ortsangabe unerlässlich. Für eine grobe Analyse genügt dazu der Name der Gemeinde. Je räumlich detaillierter die Aussagen getroffen werden sollen, desto mehr werden genauere Ortsangaben unerlässlich. Einsatzschwerpunkte lassen sich im Grunde erst mithilfe von Koordinaten genau lokalisieren, da auch Straßenangaben ohne zugehörige Hausnummern den Bereich nicht immer genau eingrenzen können. Ebenso wichtig für die Zuordnung von Einsatzeinträgen zu einem Ereignis ist eine möglichst präzise Eingrenzung der Einsatzursache. Wie bereits erwähnt, sind allgemeine Kategorien wie „Wasser“ hierfür wenig hilfreich, da die als solche kategorisierten Einsätze nicht zwingend einen Unwetterbezug aufweisen. Das Stichwort „Unwetter“ gibt an dieser Stelle bereits mehr Aufschluss. Noch differenziertere Aussagen sind möglich, wenn eine Aufschlüsselung nach Unwetterart gegeben ist. Dabei sollten nicht zu viele Unterkategorien gebildet werden, da eine große Anzahl von Kategorien die Disposition erschweren kann. Mindestens eine Unterscheidung nach wasser- oder sturmbedingten Unwettereinsätzen ist jedoch hilfreich. Als konkreter Vorschlag seien hierbei die 4 Unterkategorien „Sturm“, „Flusshochwasser“, „Starkregen“ und „Hitze/Waldbrand“ genannt, die geeignet wären, um Auswertungen im Hinblick auf klimawandelbezogene Ereignisse durchzuführen. Bestenfalls wird auch eine Möglichkeit intergiert, einem Einsatz bei Bedarf auch mehrere Wetterkategorien gleichzeitig zuordnen zu können (bspw. treten Sturm und Starkregen häufig in Kombination auf).

Die Vergabe von Kategorien zur Einsatzursache setzt voraus, dass diese Ursache bekannt ist. Gerade in der Anfangsphase eines Ereignisses besteht jedoch häufig noch kein Überblick über die Gesamtsituation, sodass es schwierig sein kann, direkt die korrekte Klassifizierung des Einsatzes vorzunehmen. Von einigen Seiten wurde im Rahmen der Befragung zudem geäußert, dass für die Abarbeitung der Einsatzstelle weniger die Ursache als vielmehr die Wirkung entscheidend sei. Deshalb kommen häufig anstelle der Ursache zunächst sogenannte Schlagworte zum Einsatz. Auch diese können begrenzt für die Zuordnung von Einsatzeinträgen hilfreich sein. „Baum auf Straße“ lässt beispielsweise recht sicher auf ein Sturmereignis schließen, insbesondere dann, wenn eine zeitliche Häufung dieser Schlagworte auftritt. „Keller unter Wasser“ erlaubt dagegen keinen eindeutigen Schluss auf eine unwetterbedingte Überflutung. Daher ist es sinnvoll, die bei der Disposition vergebenen Schlagworte im Nachhinein durch eine Angabe zur Einsatzursache zu ergänzen, sobald diese eindeutig identifiziert werden konnte.

Als „hilfreich für detailliertere Aussagen“ sind zudem die Erhebungsmerkmale Einsatzdauer und Einsatzkräfte hinterlegt. Beide sind nicht unbedingt notwendig, um Einsatzdaten einem Extremwetterereignis zuzuordnen zu können, eignen sich aber, um Aussagen über die Einsatzbelastung im Zusammenhang mit diesem Ereignis(-typ) treffen zu können. Als solche werden gegenwärtig im bundesweiten Anpassungsprozess bereits regelmäßig die Daten des THW herangezogen, um anhand der „Einsatzstunden bei wetter- und witterungsbedingten Schadensereignissen“ eine Aussage über die Auswirkungen des Klimawandels auf das Einsatzgeschehen bzw. auf den

Bevölkerungsschutz als Ganzes treffen zu können (vgl. Monitoringbericht zur DAS, UBA 2019). Wünschenswert wäre es, an dieser Stelle auch die Daten anderer Organisationen im Bevölkerungsschutz abbilden zu können.

Als optional werden Angaben zu Land, Kreis, Einsatzende und Freitext eingestuft. Je nach Fragestellung und Daten kann oder muss diese Priorisierung ggf. angepasst werden. Wenn die Angaben zur Einsatzursache keine eindeutige Zuordnung zu einem Ereignis erlauben, können die Beschreibungen im Freitextfeld mitunter aufschlussreiche Hinweise geben und müssen daher in die Datenauswertung einbezogen werden.

Technische Voraussetzungen für eine vergleichbare Erfassung schaffen

Neben den inhaltlichen Festlegungen müssten auch die technischen Voraussetzungen für eine vergleichbare Einsatzerfassung geschaffen werden. Wie die Erhebung zur Einsatzdokumentation gezeigt hat, wird allein innerhalb der relativ kleinen Stichprobe der Teilnehmenden eine Vielzahl unterschiedlicher Eingabesysteme verwendet (31 Programme). Vor dem Hintergrund der Tatsache, dass sich die Art des verwendeten Programms auf die Systematik und demzufolge die Vergleichbarkeit von Datensätzen auswirkt, erscheint es sinnvoll, ähnliche Nutzeranforderungen (im Sinne eines Mindeststandards) an die unterschiedlichen Systeme bzw. an ihre Anbieter zu stellen. WAGNER (2002) hat dazu im Rahmen eines Pilotprojekts zur Entwicklung eines bundesweit einheitlichen Auswerte- und Analysesystems (vgl. Kapitel 1.5) bereits einige Maßgaben formuliert. Darunter sind zum Beispiel Empfehlungen für Programmschnittstellen zur einfachen Datenübernahme aus Leistellensystemen oder zur Bedienbarkeit auf unterschiedlichen administrativen Ebenen (ebd., S. 28). Besonders hervorzuheben ist der dabei integrierte Ansatz eines modularen Aufbaus, der es erlaubt, dass Einsätze auf der unteren Ebene den individuellen lokalen Gegebenheiten entsprechend eingetragen werden können, diese zum Teil unterschiedlichen Daten durch einen Algorithmus aber dennoch in bundesweit vergleichbare Daten transformiert werden können (informelles Gespräch am 16.02.2021). Somit

ließen sich auch lokale Besonderheiten im System berücksichtigen, ohne dass sich diese negativ auf die Vergleichbarkeit auswirken.

Medienbruch bei händisch erfassten Informationen vermeiden

Nicht überall werden die relevanten Einsatzinformationen auch elektronisch erfasst, sondern in einem ersten Schritt, teils aber auch ausschließlich auf einem Papierformular vermerkt. Diese Daten sind, wenn sie im Anschluss nicht in ein elektronisches System überführt werden, für statistische, wissenschaftliche und weitergehende Planungszwecke im Grunde nicht nutzbar. Sofern die Daten nachgetragen werden, stellt sich die Frage, inwieweit die auf Papier und im System hinterlegten Informationen miteinander kompatibel sind. Damit die über Vordrucke erfassten Einsatzinformationen in die Auswertungen integriert werden können, ist es hilfreich, wenn auf diesen Vordrucken möglichst exakt dieselben Informationen abgefragt werden wie über das elektronische System. Analog zu einem Anforderungsprofil für elektronische Eingabesysteme wäre also ein Formular zu entwickeln, das sich mit diesen Anforderungen deckt. Die so erhobenen Informationen könnten dann leichter, möglicherweise sogar automatisiert, digitalisiert und in ein elektronisches Eingabesystem überführt werden.

Einsatzdokumentation (verstärkt) in der Ausbildung verankern

Da für die Einsatzdokumentation nicht nur geeignete Systeme und Vordrucke erforderlich sind, sondern auch das nötige Wissen vorhanden sein muss, um diese zu bedienen, wird empfohlen, die Verfahren zur Einsatzdokumentation auch in Ausbildung und Schulungen stärker zu verankern. Nach bisherigem Kenntnisstand spielt das Thema in der Ausbildung eine sehr geringe bis keine Rolle. Das spiegelt auch die Mehrzahl der Feuerwehrlehrbücher wider, die sich im Schwerpunkt mit einsatztaktischen Aspekten befassen. Demnach gilt es, die Relevanz einer vollständigen und organisationsübergreifend vergleichbaren Einsatzerfassung von Beginn an darzulegen und in die Einsatzdokumentation anhand regelmäßiger praktischer Übungen einzuführen. Grundlegend ist hierbei ein gemeinsames Verständnis bezüg-

lich der notwendigen Angaben und Begrifflichkeiten in den Formularen und/oder Programmen.

Auch im laufenden Dienstbetrieb sollte der Bedarf nach Schulungen zur Einübung und/oder Festigung der erforderlichen Kenntnisse für die Einsatzdokumentation regelmäßig unter den Mitgliedern erfragt werden. Insbesondere bei Einführung neuer Dokumentationsverfahren oder Programme sollten zeitnah Schulungen angeboten werden.

Institutions- und ebenenübergreifenden Austausch fördern

In nahezu allen zuvor dargelegten Vorschlägen kam deutlich zum Ausdruck, dass es für eine wie auch immer konkret zu gestaltende Weiterentwicklung der Einsatzerfassung mehrerer Akteure bedarf. Aus welchen Ebenen sich diese Akteure zusammensetzen, hängt davon ab, für welchen Radius Änderungen angestrebt werden. Für eine landesweite Neuregelung sollten neben der Landesverwaltung selbst auch Kreis- und Kommunalverwaltungen sowie die operativen Ebenen als ausführende Kräfte (Leitstelle, Einsatzorganisation) beteiligt werden, um einen allseitig praktikablen Ansatz zu entwickeln. Mehr Verbindlichkeit erhält ein solcher Austausch durch eine Formalisierung, etwa in Form einer Arbeitsgemeinschaft oder eines Ausschusses, der spezifisch mit dem Ziel der Entwicklung eines gemeinsamen Konzepts gebildet wird. Im Niedersächsischen Rettungsdienstgesetz wird diese Aufgabe z. B. unter dem Punkt „Qualitätsmanagement“ bzw. Entwicklung von „Qualitätsstandards“ vermerkt und über einen Landesausschuss ausgeführt (§ 13, Abs. 2 NRettdG). Ähnliches wäre auch für den Bereich der Einsatzdokumentation im Katastrophenschutz denkbar, wobei, wie beschrieben, die Einbeziehung weiterer Ebenen als äußerst sinnvoll erachtet wird.

Resümierend hängen viele der ausgeführten Vorschläge eng miteinander zusammen. Im Wesentlichen haben sie zum Ziel, eine Kompatibilität zwischen den erfassten Einsatzinformationen und den dabei verwendeten Dokumentationsformen und -systemen herzustellen. Dabei könnten im Rahmen einer eventuellen Weiterentwicklung

Synergien zur Beobachtung anderer, über die Einsatzdaten abbildbarer Entwicklungen genutzt werden. Beispielsweise wird unter dem Blickwinkel des demografischen Wandels von HERTLER & WARNER (2011) ebenso das Interesse an einer geeigneteren Planungsgrundlage in Form von Einsatzdaten geäußert. Unter der Annahme, dass sich der gegenwärtige Strukturwandel in der Bevölkerung (u. a. durch Anstieg des Durchschnittsalters, mehr Ein-Personen-Haushalte) in einer höheren Zahl an Feuerwehr- und Rettungsdienst-Einsätzen niederschlägt, wird z. B. ebenfalls eine Überarbeitung der Klassifizierung von Einsatzursachen bzw. -arten vorgeschlagen, um diese als Grundlage für die Einsatzplanung im Hinblick auf einsatzverursachende Personengruppen nutzen zu können.

Auch wäre eine Orientierung an Standardisierungsprozessen in themenverwandten Bereichen wie dem bundesweit einheitlichen Notarzt-Einsatzprotokoll oder dem erst kürzlich entwickelten Einsatzprotokoll für die psychosoziale Notfallversorgung möglich (HERING & HELMERICHS 2018). Die Grundlage eines Erfolg versprechenden Prozesses ist dabei stets dieselbe: ein breit und offen angelegter Austausch mit Akteuren aller denkbar beteiligten Institutionen und Organisationen, der allein ein gemeinsames Konzept hervorbringen kann, das von allen Ebenen und Einrichtungen gewinnbringend und praktikabel umgesetzt werden kann.

8.1.2. Vorbereitende Maßnahmen

Maßnahmen der Vorbereitung werden dann eingeleitet, sobald sich ein konkretes Ereignis im oder nahe dem eigenen Zuständigkeitsbereich ankündigt. Sie basieren in der Regel auf bereits vorab festgelegten Strukturen und Konzepten, die nun aktiviert werden müssen. Je frühzeitiger das wahrscheinliche Eintreten eines Ereignisses erkannt wird, desto geordneter kann die Vorbereitung auf das Ereignis vollzogen werden.

8.1.2.1. Früherkennung von Starkregen und Sturzfluten

Auch wenn der Fokus des KlamEx-Projekts auf Starkregen lag, wurden dadurch potenziell ausgelöste Sturzfluten beispielsweise im Rahmen der

Dialogveranstaltung mit den Kommunen thematisiert, sodass die Empfehlungen zur Früherkennung an dieser Stelle auch auf Sturzflutereignissen ausgeweitet werden sollen. In der Diskussion zeigte sich ein hoher Bedarf am Austausch über geeignete Messmethoden, die in Ergänzung zur (räumlich meist ungenauen) meteorologischen Vorhersage die rechtzeitige Erkennung von Starkregen und Sturzfluten unterstützen können. Tatsächlich ist die Früherkennung von Unwetterereignissen für die Gefahrenabwehrbehörden überaus wichtig, um nicht nur die lokale Bevölkerung frühzeitig warnen bzw. alarmieren, sondern auch um selbst bereits vorbereitende Maßnahmen möglichst noch vor Eintritt des schädigenden Ereignisses einleiten zu können (vgl. Kapitel 8.1.2.3 und 8.1.2.4).

Für die Erkennung von Starkregen und sturzflutauslösenden Faktoren schlägt SCHMITZ-KRÖLL (2020) ein dreistufiges Monitoring vor. Während sich die ersten beiden Stufen auf die Beobachtung der Wetterlage beziehen, sollen in der dritten Stufe gezielt weitere Parameter überwacht werden, die Hinweise auf das potenzielle Auftreten einer durch das Starkregenereignis ausgelösten Sturzflut geben können. Jene unter dem Aspekt des lokalen Monitorings aufgeführten Optionen fallen im Grunde in den Bereich der präventiven Maßnahmen, da sie eine längere Vorplanung erfordern und nicht ad hoc umgesetzt werden können. Der Einfachheit und Vollständigkeit wegen werden sie jedoch gemeinsam mit den anderen Maßnahmen der Früherkennung unter diesem Punkt aufgeführt.

„Globales“ Monitoring

Bei normaler, unauffälliger Wetterlage bedarf es keines Monitorings im eigentlichen Sinne. Es sollte jedoch gewährleistet sein, dass die aktuelle Warnlage des DWD für den eigenen Bereich bekannt ist und Aktualisierungen, die auf die Entwicklung von Unwetterereignissen hindeuten, umgehend wahrgenommen werden können. Es kann hilfreich sein, diese Aufgabe des „globalen“ Wettermonitorings an eine feststehende Person zu vergeben, die bei Bedarf Auskünfte erteilen und umgekehrt dringliche Informationen an alle zuständigen Einheiten weitergeben kann.

Einer der Interviewpartner berichtete positiv von einem „direkten Draht zum Meteorologen vom Dienst“: „Wenn irgendwas ansteht [...] oder in der Luft liegt, dann können wir da anrufen und können fragen, wie schätzt er die Situation ein und was könnte denn da auf uns zukommen. So haben wir bis jetzt immer gute bis sehr gute Informationen bekommen.“ (Interview Potsdam)

Als Informationsgrundlage eignet sich z. B. der frei zugängliche Bereich des Internetportals des DWD (www.dwd.de), der den separaten Bereich „Amtliche Warnungen“ enthält. Dort lässt sich die aktuelle Warnsituation bis auf die Ebene der Kommunen abrufen. Ebenso sind Warnlageberichte für Deutschland und die einzelnen Bundesländer sowie eine Wochenvorhersage für Wettergefahren verfügbar. Einem gesetzlichen Auftrag nach bietet der DWD darüber hinaus Fachinformationen für Anwender aus dem Bereich des Katastrophenschutzes, das sog. „Feuerwehr-Wetter-Informationssystem“ (FeWIS). Diese webbasierte Anwendung stellt unterschiedliche, auch für Laien verständliche Wetterinformationen zur Verfügung und warnt auf Ebene der Landkreise bzw. kreisfreien Städte vor heranziehenden Unwettern (DWD o. J.). Diese Informationen können den Nutzern zusätzlich per E-Mail und/oder SMS zugestellt werden. Auch die WarnWetter-App des DWD enthält Warnlageberichte und die aktuelle Wettersituation.

Regionales Monitoring:

Wird konkret vor Starkregenereignissen für den eigenen Zuständigkeitsbereich gewarnt, sollte das Monitoring kleinräumiger und individuell durchgeführt werden. Dies bedeutet, die aktuelle Wetterentwicklung mittels entsprechender Anwendungen bewusst zu beobachten. Das Ziel ist es hierbei, so frühzeitig wie möglich zu erkennen, wenn sich Gewitterzellen entwickeln/entwickelt haben, deren Zugbahnen den eigenen Bereich tangieren könnten. Das Monitoring an sich muss dabei „manuell“ durchgeführt werden. Spätestens an dieser Stelle bedarf es also einer oder eines (möglichst schon im Vorhinein festgelegten) Mitarbeitenden aus der für die Überwachung zuständigen Stelle (in aller Regel der Leitstelle), der für die weitere Beobachtung des Wettergeschehens verantwortlich ist.

Für die Überwachung der regionalen und lokalen Wetterentwicklung werden diverse webbasierte Tools verschiedener Anbieter angeboten. Der Neutralität wegen wird an dieser Stelle auf eine Vorstellung verzichtet, sie können jedoch z. B. bei MOTSCH (2019) im Detail nachgelesen werden.

Lokales Monitoring:

Die ersten beiden Monitoring-Ebenen können von den dafür vorgesehenen Personen innerhalb der Gefahrenabwehr mithilfe der vorhandenen Systeme zur Wetterbeobachtung eigenständig durchgeführt werden. Lokalspezifische Schadens- oder auch sturzflutauslösende Faktoren und Indikatoren lassen sich jedoch damit nicht überwachen. Selbiges gilt auch für Pegelstände und Abflussmengen von lokalen Fließgewässern, denn das bestehende amtliche Messnetz ist an dieser Stelle nicht kleinräumig genug ausgeführt (ELTNER et al. 2018). Im Bereich des lokalen Monitorings bedarf es demnach des Aufbaus oder der Verdichtung eines örtlichen Messnetzes – und damit eigener Überlegungen, (finanziellem) Aufwand und Engagement, um die benötigten Möglichkeiten für die Überwachung gefährdender Faktoren und Situationen zu schaffen. Die Einrichtung ortseigener Messverfahren wird in der Regel von den fachlich zuständigen Ämtern innerhalb der Kommunalverwaltung angestoßen und geleitet. Bei der Planung hat sich eine enge Zusammenarbeit mit den Feuerwehren nicht zuletzt aufgrund ihrer Einsatzerfahrungen bewährt (o. V. 2021).

Dabei gilt es zunächst die Frage zu beantworten, an welchen Stellen („Hotspots“) Mess- und Überwachungspunkte errichtet werden sollen. Hinweise auf Schadensschwerpunkte können z. B. von den folgenden Möglichkeiten ausgehen:

- Einsatzschwerpunkte aus zurückliegenden Ereignissen, die durch die Verschneidung von Einsatzdaten mit Kartenmaterial und ggf. Niederschlagsdaten eine genaue Lokalisation erlauben (vgl. Kapitel 7)
- Erfahrungswerte aus zurückliegenden Ereignissen, auch aus der Bevölkerung

- Hydrologische Geländemodelle, insbesondere in Form von Starkregengefahrenkarten, welche die bei Starkregen gefährdeten Bereiche darstellen

Insbesondere die Erstellung von Starkregengefahrenkarten eröffnet die Möglichkeit, ganze Stadtgebiete in Bezug auf ihre Gefährdung bei Starkregenereignissen zu betrachten. Ihre Anfertigung ist jedoch – im Gegensatz zu der von Hochwassergefahrenkarten – keine Pflichtaufgabe und darüber hinaus mit einem gewissen finanziellen Aufwand verbunden. Folglich sind sie erst in weniger als 10 % der deutschen Kommunen vorhanden (FELDMANN 2019).

An den ermittelten Hotspots lässt sich Technik zur Messung des Pegels, des Durchflusses und/oder eine Videoüberwachung installieren. Während Pegelmessgeräte ständig den aktuellen Wasserpegel messen, kann mittels Videokameras die Situation an den Hotspots auch visuell fernüberwacht werden. So könnte im Falle des Falles z. B. der Bereich vor einem Durchlass begutachtet werden – Einstauungen würden so zeitnah erkannt. Die Überwachung der Messstellen sollte grundsätzlich jederzeit erfolgen können. Insbesondere in sturzflutgefährdeten Gebieten ist die aktive Kontrolle der Hotspots bei Ankündigung eines Starkregenereignisses von besonderer Bedeutung. Damit einher geht die Notwendigkeit, die Messdaten und/oder Videobilder an ständig besetzte Stellen übertragen zu können. Diese Aufgabe wird von einigen Systemen automatisch übernommen, sobald vordefinierte Schwellenwerte überschritten werden. Ein solches kombiniertes System aus lokaler Pegelmessung, Videoüberwachung und automatisierter Übertragung in Echtzeit wurde beispielsweise im Rahmen des Projekts „Hierarchisches Frühwarn- und Alarmierungssystem für plötzliche Sturzfluten nach Starkregenereignissen“ (HAPLUS) für einige Kommunen in Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen realisiert und ist nach eigener Angabe mit geringem Aufwand auch auf andere gefährdete Gebiete übertragbar (KÜHN GEOCONSULTING GMBH 2018). Als kostengünstige Alternative für fest installierte Systeme ist auch die Anwendung mobiler, mietbarer Kamerasysteme denkbar.

Lokale Monitoringsysteme befinden sich bereits in einigen Kommunen in der Anwendung. In der Mehrzahl handelt es dabei um Orte, die bereits (erheblich) von Starkregen- und Sturzflutereignissen betroffen waren.

8.1.2.2. Warnung/Alarmierung der Bevölkerung

Wenn im Rahmen der Früherkennung die Erkenntnis gewonnen wurde, dass es mit hoher Wahrscheinlichkeit im unmittelbaren Bereich der Kommune zu einem Starkregen- und ggf. auch Sturzflutereignis kommen wird, gilt es, die Bevölkerung davor zu warnen (bei latenter Gefahr) und – möglicherweise gleichzeitig – zu alarmieren (bei akuter Gefahr). Darüber hinaus bedarf es der Information der Bürgerschaft über das sich ankündigende Ereignis, auch wenn (noch) keine Gefährdung vorliegt (vgl. zur Abgrenzung der Begriffe RECHENBACH 2017). Die Wetterwarnung ist insofern auf einer Zwischenstufe der Risiko- und Krisenkommunikation zu verorten (vgl. BÜSER 2019). Im Folgenden geht es dabei nicht um die Wetterwarnung an sich, die auf gesetzliche Weisung durch den Deutschen Wetterdienst erfolgt. Im Vordergrund steht stattdessen die Vermittlung dieser Wetterwarnung in Verbindung mit einer möglichen Warnung vor auftretenden Folgen (Impaktwarnung) an die lokale Bevölkerung.

Zunächst muss es gelingen, möglichst alle potenziell Betroffenen quantitativ und qualitativ zu erreichen. Wichtig ist dabei die Erkenntnis, „dass kein einzelnes System eine umfassende Warnung bzw. Alarmierung [...] gewährleistet“ (RECHENBACH 2017, S. 249). Das liegt daran, dass von der Bevölkerung unterschiedliche Mittel zur Information genutzt werden. Während einige, insbesondere ältere, Bevölkerungsgruppen eher auf klassische Kanäle wie Radio und Fernsehen setzen, präferieren andere digitale Kanäle wie das Internet – inklusive der sozialen Medien – und mobile Anwendungen. Beachtet werden muss aber auch, dass es durchaus zum Ausfall einzelner Mitteilungssysteme kommen kann, insbesondere bei Lagen mit Auswirkungen auf die technische Infrastruktur (HOFMANN & HÖBEL 2014). Demnach müssen im Optimalfall also mehrere Mittel zur Warnung bzw. Alarmierung kombiniert zum Einsatz kommen (RECHENBACH 2017; MÜLLER-TISCHER 2018).

Eine Warnung muss die Bürgerinnen und Bürger aber nicht nur technisch, sondern auch inhaltlich erreichen und möglichst ein korrektes Verhalten auslösen. Dazu muss sie zunächst durch die Alarmierung die nötige Aufmerksamkeit erzeugen (Weckfunktion), um eine Sensibilisierung für die jeweilige Gefährdung zu erzielen (BÜSER 2019). Die eigentliche Information über die Art und das erwartete Ausmaß der Gefährdung muss dabei so gestaltet sein, dass sie von der gesamten Bürgerschaft verstanden werden kann (vgl. dazu ausführlich KOX & GERHOLD 2019). Um außerdem die erwünschten Verhaltensweisen hervorzurufen, ist es empfehlenswert, die Warnung vor dem Ereignis mit konkreten Handlungsanweisungen zu Selbstschutz und Selbsthilfe zu kombinieren, wie es beispielsweise in der Warnapp NINA des BBK umgesetzt wird. Die Hinweise sollten dabei auch die Aufforderung beinhalten, von unnötigen Notrufen abzusehen, um die Leitstelle zu entlasten.

Häufig wird im Zusammenhang mit der Warnung vor Extremwetterereignissen die Frage aufgeworfen, ob nicht auch zum Teil eine „Überwarnung“ stattfindet. Die Annahme ist, dass die gewarnte Bevölkerung keine angemessenen Schutzmaßnahmen mehr treffe, wenn es in der Vergangenheit zu oft unzutreffende Warnungen und Fehlalarmierungen gegeben hat (z. B. KUTSCHKER 2018, BÜSER 2019, SCHMITZ-KRÖLL 2020). Ein Vertrauensverlust und ein Ignorieren der Warnungen müssen also vermieden werden. Hierzu ist besonders das Vertrauen in die genutzten Informationsquellen sowie den Kommunikator der Informationen entscheidend (BÜSER 2019). SCHMITZ-KRÖLL (2020) merkt dazu an, dass es für die Stellen, welche die Warnungen an die Bevölkerung kommunizieren, von besonderer Bedeutung sei, die Deutungshoheit für die Warnung und Alarmierung zu besitzen. Die Bevölkerung dürfe sich dabei ausschließlich auf „ihre Stelle“ (z. B. Feuerwehr) verlassen wollen – und müsse sich darauf im Umkehrschluss auch verlassen können.

8.1.2.3. Vorbereitende Maßnahmen in der Leitstelle

Schadensträchtige Starkregenereignisse gehen in der Anfangsphase meist mit einer völligen Überlastung der Leitstellen einher. Neben dem hohen Koordinierungsbedarf hinsichtlich einer Vielzahl von Kräften verschiedener Organisationen an diversen Örtlichkeiten ist hierfür das immense Notrufaufkommen verantwortlich, das trotz Maximalbesetzung oft kaum noch zu bewältigen ist. Wesentlich für die Vorbereitung der Leitstellen ist daher eine Erhöhung der Abfragekapazitäten bei gleichzeitiger Reduktion des Notrufaufkommens.

Erhöhung der Abfragekapazitäten

Um die maximal mögliche Menge der Notrufabfragen zu erhöhen, können sowohl technische und personelle als auch organisatorische Maßnahmen zur Anwendung kommen.

- a. Technische Maßnahmen: Auf technischer Ebene besteht die Möglichkeit, die Leitstellen so auszustatten, dass im Bedarfsfall die Anzahl an Abfrageplätzen erheblich erhöht werden kann. Dabei muss es sich tatsächlich in erster Linie um Abfragemöglichkeiten und EDV handeln, mit der die Notrufe angenommen und dokumentiert werden können. Denkbar sind in diesem Zusammenhang auch behelfsmäßige Abfrageplätze, die mit einem Telefon und z. B. einem mit dem jeweiligen Leitstellenprogramm ausgerüsteten Laptop ausgestattet sind. Bei einer zu erwartenden Ausnahmesituation (z. B. nach der Ausgabe von Wetterwarnungen einer bestimmten Warnstufe) sollte die Technik bereits vorbereitet und einsatzfähig gemacht werden, sodass eintreffendes Unterstützungspersonal umgehend tätig werden kann.
- b. Personelle Maßnahmen: Wird die Anzahl der Abfrageplätze erweitert, bedarf es entsprechend einer Verstärkung des Personals. Neben einer Alarmierung von möglicherweise vorhandenen Bereitschaftskräften und dienstfreien Kräften können verschieden gelagerte (i. d. R. im Vorfeld entwickelte) Konzepte zur Anwendung kommen. Diese sehen z. B. eine Unterstützungsgruppe aus (freiwilligen) Feuerwehrleuten vor, welche die Leitstelle im Bedarfsfall verstärken kann. Diese Personen müssen zuvor in den Leitstellentätigkeiten, z. B. als sogenannte „Calltaker“ (d. h. in der Notrufannahme), geschult worden sein. Eine nicht unwesentliche Frage bei der Maximierung des Personals betrifft den Zeitpunkt der Alarmierung der Kräfte. So sollte die größtmögliche Abfragekapazität bereits bei Eintritt eines Ereignisses zur Verfügung stehen. Wird erst während oder nach dem Ereignis alarmiert, kann es zu Verzögerungen im Aufwachsen kommen, da alarmierte Unterstützungskräfte möglicherweise selbst von den Auswirkungen des Ereignisses betroffen sind und nur unter erschwerten Bedingungen in die Leitstelle gelangen können.
- c. Organisatorische Maßnahmen: Auch auf organisatorischer Ebene lässt sich die Abfragekapazität erhöhen. Dazu bedarf es zumindest bei Teilen des Leitstellenpersonals einer Entlastung von Aufgaben, die regulär neben der Notrufabfrage durchzuführen sind (Disposition, Alarmierung, Funkverkehr, Dokumentation usw.). Notrufe in Bezug zu dem Extremereignis sind also von diesen Personen lediglich abzufragen und als Einsatz anzulegen, der dann als Einsatzmeldung an die örtlich zuständige Feuerwehr übermittelt wird. Eine Zuteilung des Einsatzes an bestimmte Einsatzkräfte/Einheiten erfolgt durch den Abfragenden jedoch nicht und wird durch andere Teile des Leitstellenpersonals wahrgenommen. Hiervon kann selbstverständlich bei dringenden Notfällen abgewichen werden. Des Weiteren sollte der Funkverkehr mit der Leitstelle bis auf dringend notwendige Meldungen eingestellt werden. Ausrück- sowie Rückmeldungen und dergleichen sollten unterbleiben, damit sich die Kräfte vollständig auf die Anrufabfrage konzentrieren und Zeit einsparen können. Um auf diese Weise verfahren zu können, bedarf es einer besonderen Führungsordnung für diese Lagen, die ebenfalls im Vorfeld für die Sonderlage festzulegen ist.

Reduzierung des Notrufaufkommens

Um zeitgleich zur Erhöhung der Abfragekapazitäten das Aufkommen vermeidbarer, im engeren Sinn nicht als solche zu bezeichnender Notrufe zu reduzieren, bieten sich zum einen Maßnahmen der Risikokommunikation, im Ereignisfall auch der Krisenkommunikation an. Zu nennen ist hierbei insbesondere die Bitte, den Notruf nicht unnötig zu belasten, die bereits bei der Ausgabe von Warnmeldungen sowie bei Mitteilungen während eines oder nach einem Ereigniseintritt mitgesendet werden kann (vgl. Kapitel 8.1.2.2). Zum anderen kann eine Diversifizierung der Meldemöglichkeiten dazu beitragen, die Belastung der Notrufleitungen zu mindern. Als Alternativen zum Notruf können z. B. eine Telefonhotline oder eine Eingabemöglichkeit im Internet, etwa auf der Internetpräsenz der Kommune, eingerichtet und angeboten werden. Damit ist Betroffenen die Möglichkeit gegeben, sich abseits des Notrufs mitzuteilen, Informationen bezüglich des Ereignisses zu erhalten und (zeitlich unkritische) Unterstützung anzumelden. Für beide Optionen bedarf es wiederum einer im Vorfeld zu hinterlegenden Infrastruktur, sodass diese im Ereignisfall zeitnah aktiviert und auch mit personellen Ressourcen hinterlegt werden kann.

8.1.2.4. Vorbereitende Maßnahmen in der Einsatzorganisation

Für die Abarbeitung der zahlreichen Einsatzstellen ist die Verfügbarkeit möglichst vieler Einsatzkräfte vor Ort wesentlich. Es sollte demnach rechtzeitig – d. h. noch vor Eintritt des Ereignisses – darauf hingewirkt werden, die einzelnen Standorte mit der maximal verfügbaren Anzahl an Kräften der höchstwahrscheinlich betroffenen Gebietskörperschaft(en) zu besetzen. Dies ist in der Regel nur über einen Vollalarm möglich. Die Bestimmung des richtigen Zeitpunkts, wann solche umfangreichen Alarmierungen durchgeführt werden, ist in der Praxis nicht ganz einfach, wie auch die Diskussion im Rahmen der Dialogveranstaltung mit den Kommunen offenbarte. Weder will dieser Zeitpunkt verpasst und in Kauf genommen werden, dass die Liegenschaften nur noch unter erschwerten Bedingungen erreicht werden können, noch wollen zahlreiche Kräfte unnötigerweise aktiviert worden sein. Die Ver-

antwortung für die Alarmierung bei Starkregen sollte deshalb bereits im Vorfeld an einen Mitarbeitenden übertragen werden, der sowohl über die Erfahrung als auch über das nötige Fachwissen verfügt, um die Situation möglichst korrekt bewerten zu können. Eine laufende Abstimmung mit der/den für das Monitoring verantwortlichen Person(en) ist dabei unerlässlich.

Neben der Alarmierung der eigenen Kräfte gilt es auch zu entscheiden, ob und wann überörtliche Kräfte angefordert werden müssen. Der dafür vorgesehene Zeitpunkt kann bereits in den vorgeplanten Konzepten (vgl. Kapitel 8.1.1.3) verankert werden und somit die Entscheidung im Ereignisfall erleichtern. Um die Unterstützungskräfte effektiv einsetzen zu können, sollten sie Einsatzstrukturen vorfinden, in die sie sich gezielt eingliedern können, und es muss den Kräften bekannt sein, auf welchem Weg sie sich bei wem anzumelden und den Einsatzauftrag zu empfangen haben. Aus diesen Gründen ist es unabdingbar, dass zumindest ein sog. Meldekopf als zentrale Anlauf- und Koordinierungsstelle eingerichtet wird. Falls ein Bereitstellungsraum zur Verfügung steht, sollte dieser nun für die Inbetriebnahme vorbereitet und mit dem vorgesehenen (Führungs-)Personal besetzt werden.

8.1.3. Maßnahmen der Bewältigung

Maßnahmen der Bewältigung stehen im Vordergrund, sobald ein Ereignis eingetreten ist. Ebenso wie die vorbereitenden Maßnahmen bauen sie im Regelfall auf im Vorfeld definierte Strukturen und Abläufe auf.

8.1.3.1. Erst- und Folgemaßnahmen in der Einsatzorganisation

Nach dem Eintritt des Ereignisses und entsprechender Folgen scheint eine zunächst „abwartende“ Taktik als zielführend. Das bedeutet, dass sich die Kräfte nicht in Bagatelleinsätzen binden dürfen. Es muss in diesem ersten Stadium der Lage klar sein, dass Arbeiten wie das Füllen von Sandsäcken und ihr Verbau oder das Auspumpen überfluteter Keller grundsätzlich zu vernachlässigen sind. Nur so ist gewährleistet, dass für definitionsgemäße Notfälle sofort Kräfte zur Verfügung

stehen. Solange kein Überblick über die Gesamtlage besteht und noch keine Schadensschwerpunkte bekannt sind, sollten die Einheiten zudem grundsätzlich in ihren Standorten verbleiben, um eine großflächige Abdeckung des Gemeindegebiets gewährleisten und bei Bedarf flächig tätig werden zu können.

Eine taktische Einheit sollte sich jedoch der Erkundung widmen. Neben dem Ziel, einen Überblick über die Gesamtlage zu gewinnen, dient sie der Priorisierung von Einsatzstellen, da diese aus den Schadensmeldungen allein nicht in jedem Fall erkannt werden kann (OTT et al. 2018). Durch das Einholen zusätzlicher Informationen kann sichergestellt werden, dass Schadensstellen mit höherer Gefahr nicht erst nach solchen mit niedrigerem Gefahrenpotenzial abgearbeitet werden. Um in der Erkundung dennoch zielgerichtet vorgehen und sich auf die wesentlichen Informationen konzentrieren zu können, bietet sich die Vorplanung von Erkundungspunkten an. Dies könnten z. B. sein:

- bekannte Problemstellen an Gewässern
- Brückenbauwerke und Durchlässe
- Objekte, deren Schädigung viele Menschen zeitgleich gefährden kann (z. B. Krankenhäuser, Pflegeeinrichtungen)
- Verkehrswege mit einsatztaktischer Bedeutung
- weitere Kritische Infrastrukturen wie Wasserwerke, Kläranlagen, Umspannwerke

Wenn auch im Rahmen der Erkundung noch keine Maßnahmen zur Gefahrenabwehr getroffen werden, sofern diese nicht unbedingt notwendig sind, empfiehlt es sich, Betroffenen baldmögliche Hilfe in Aussicht zu stellen und ihnen Hinweise zur Selbsthilfe zu geben. Bei einigen Einsatzstellen können diese allein schon ausreichen, um den

Schaden zu beheben und somit keinen Einsatz im eigentlichen Sinne mehr erforderlich zu machen.

Nach Abschluss der Erkundung beginnt die eigentliche Abarbeitung der eingetroffenen Schadensmeldungen nach den Grundsätzen der Priorisierung (Menschenrettung vor Sachwertschutz, Kritische Infrastruktur vor individuellem Besitz) und den vorgeplanten taktischen und strukturellen Überlegungen (vgl. z. B. Kapitel 8.1.1.3). Parallel dazu kann das Räumen von blockierten (Hauptverkehrs-)Straßen eine erforderliche Maßnahme sein, um Hindernisse in der Fortbewegung von Einsatzkräften zu beseitigen. Neben der naheliegenden Fokussierung auf die durch das Starkregenereignis entstandenen Schäden muss die Abarbeitung von Ereignissen der täglichen Gefahrenabwehr im Sinne des Grundschutzes gewährleistet bleiben (vgl. auch Protokoll der 1. Dialogveranstaltung).

8.1.3.2. Aspekte der Führung

Dass die Führungsstruktur bei Extremwetterlagen sinnvoll einem vom Tagesgeschäft abweichenden Aufbau folgen kann, haben die Ausführungen zur Vorplanung einer Einsatzstruktur bereits gezeigt (vgl. Kapitel 8.1.1.3). In der Phase der Ereignisbewältigung ist nun die gelingende Umsetzung der vorgeplanten Strukturen maßgeblich, wobei die Entscheiderinnen und Entscheider auch in der Lage sein müssen, flexibel auf die jeweiligen Gegebenheiten zu reagieren. Hierunter zählt insbesondere bei Extremwetterereignissen die Fähigkeit und Möglichkeit, Führungsunterstützung anzufordern – ein Bedarf, der umso dringlicher wird, je räumlich und zeitlich ausgedehnter sich die Lage darstellt, denn die Aufgaben der Einsatzleitung (auf die hier nicht im Einzelnen eingegangen werden soll) sind zahlreich, wie Abbildung 95 zeigt.

S1 Personal	S2 Lage	S3 Einsatz	S4 Versorgung	S5 Presse	S6 IuK
Alarmierung	Beschaffen von Lageinformationen	Lagebeurteilung	Nachforderungen	Presse- und Medieninformation	Abstimmen von Führungs- und Fernmeldeorganisation
Bereitstellen von Reserven	Führen einer Lagekarte	Festlegen von Einsatzschwerpunkten	Bereitstellung von Hilfsmitteln, Verbrauchsgütern, Verpflegung	Vorbereiten von Pressekonferenzen	Bereitstellung von Kommunikationskapazitäten
Einrichten von Bereitstellungsräumen	Abgabe von Lagemeldungen	Raumordnung	Materialerhaltung	Betreuung Infotelefon	Ausstattung von Befehlsstellen
Führen von Kräfteübersichten	Einsatztagebuch	Befehlsgebung	Unterbringung von Einsatzkräften	Warn- und Suchhinweise an die Bevölkerung	Führen der IuK-Einheiten
		Lagebesprechung			

Abb. 95: Auszug der Aufgaben einer Einsatzleitung (Quelle: nach OTT et al. 2018, S. 99).

Die Ansicht, „dass man das alles noch selbst schaffen kann“, scheint zumindest ab einem gewissen Grad nicht mehr zielführend, sondern mündet im Gegenteil in Defiziten in der Führungsstruktur und in einer deutlichen Überlastung der lokalen Kräfte, wie die folgende Erfahrung bei einem schwerwiegenden Ereignis zeigte: „Meine Führungskräfte, meine Zugführer, waren dann wirklich in der Tat vom 01. Juni bis zum 08. Juni komplett im Einsatz und lediglich am, ich weiß nicht, am Sonntag dann, also am fünften Tag, glaube ich war das dann, habe ich denen dann wirklich selbst einmal eine Pause verordnet, weil man hat einfach gemerkt, [...] die waren einfach ausgemergelt – komplett, die waren einfach richtig fertig. [...] Es hat sich dann halt rausgestellt, dass es einfach besser gewesen wäre, wenn man das gemacht hätte (Anm.: gemeint ist die Hilfeanforderung)“ (SCHMITZ-KRÖLL 2020, Anhang 2, S. 19).

Wenn der Bedarf an Führungskräften aus den eigenen Reihen nicht mehr gedeckt werden kann, bietet sich – analog zu den überörtlich tätig werdenden Einsatzkräften – die Anforderung von überörtlichem Führungspersonal an. Einige Länder wie Baden-Württemberg, Bayern und Nordrhein-Westfalen haben für diesen Fall Konzepte für die „Mobile Führungsunterstützung von Stäben“ (MoFüSt) entwickelt, mit deren Hilfe kurzfristig sog. Unterstützungsgruppen mobilisiert werden können. Diese Gruppen werden in bestimmter Anzahl innerhalb der Verwaltungsebenen vorgehalten und sind mit entsprechenden Fahrzeugen und Material ausgestattet, sodass sie mobil und an einem beliebigen Ort einsetzbar sind. Ein solcher Ansatz hat sich in vergangenen Starkregenlagen auch bewährt (vgl. SCHMITZ-KRÖLL 2020) – Voraussetzung ist jedoch, dass davon auch verantwortungsvoll Gebrauch gemacht wird.

8.1.3.3. Krisenkommunikation

Die Krisenkommunikation erfolgt sowohl innerhalb und zwischen den zuständigen Einrichtungen des Katastrophenschutzes als auch mit anderen, häufig nicht unmittelbar in die Bewältigung involvierten Akteuren (externe Institutionen, Wirtschaftsunternehmen, Medien und Öffentlichkeit bzw. Bevölkerung) (GEENEN 2017b). Im Gegensatz zur Risikokommunikation steht sie unter dem Druck der akuten (Gefahren-)Situation und muss innerhalb kurzer Zeit und möglichst proaktiv die wesentlichen Informationen vermitteln. Letztere müssen zudem zwischen den Informationsträgern abgestimmt sein, um Fehlinformationen und Verwirrung bei unterschiedlichen Quellen zu vermeiden. Während die Kommunikation innerhalb und zwischen den Organisationen der Gefahrenabwehr meist funkbasiert und zielgerichtet geschieht, gilt es sowohl in der Bevölkerung als auch bei der Risikokommunikation, *alle* potenziell Betroffenen zu erreichen und umgekehrt auch Informations- und Kommunikationsbedarfe aus der Bevölkerung aufzunehmen.

Meldungen aus der Bevölkerung werden dabei verstärkt über die sozialen Medien mitgeteilt. Dabei kann es sich um ernsthafte Hilfeaufrufe, geteilte Informationen über die Lage (häufig in Form von Bild- und Videoaufzeichnungen), Meinungen und Kritik, aber auch um Gerüchte und Falschinformationen handeln. Daher sollte dem Social Media-Monitoring im Rahmen der Krisenkommunikation eine wichtige Rolle beigemessen und dieses auch entsprechend personell hinterlegt werden. Zur Unterstützung der Einsatzstäbe bei der Analyse und Auswertung der sozialen Medien bietet sich die Gründung eigens dafür eingesetzter Teams – sogenannter Virtual Operations Support Teams (VOST) – an. Aufgabe der VOST ist die Generierung eines Echtzeit-Lagebilds. Dafür sammeln, bearbeiten und bewerten die VOST – in der Regel zusammengesetzt aus Mitgliedern der im Bevölkerungsschutz mitwirkenden Organisationen – Informationen durch Echtzeitanalysen und leiten sie an die Einsatzleitung oder den Stab weiter. Eine zunehmend wichtige Aufgabe dieser Teams ist außerdem die Identifizierung von Falsch- und Desinformationen sowie die Integration aller Informationen in ein Geoinformati-

onssystem. Teilweise kommt den VOST auch eine aktive Rolle bei der Verbreitung von Informationen (z. B. Klarstellung von Falschinformationen) zu. Das erste VOST wurde 2017 als neue Einheit im THW gegründet. Auf Ebene der Bundesländer und Landkreise haben sich in den Folgejahren ebenfalls weitere VOST etabliert. Gerade wenn in der jeweiligen Organisation keine eigenen Ressourcen für diese personal- und zeitintensiven Aufgaben bei Großschadenslagen zur Verfügung stehen, sollte die Einbindung eines VOST in Erwägung gezogen werden.

Neben dem organisationsinternen Sammeln von Informationen bildet auch die Weitergabe von Informationen an die Bevölkerung einen wichtigen Teil der Krisenkommunikation. In flächenhaften Lagen infolge eines Starkregenereignisses gilt es insbesondere der Bevölkerung immer wieder zu verdeutlichen, dass die Ressourcen zur Bewältigung der zahlreichen Einsatzstellen begrenzt sind und deshalb nicht unbedingt mit sofortiger individueller Hilfe zu rechnen ist, sofern keine Gefahr für Leib und Leben droht. Zeitgleich sollten die Bürgerinnen und Bürger mit einfachen Handlungsanweisungen zur Selbsthilfe angeleitet werden, um das Notrufaufkommen zu senken (vgl. Kapitel 8.1.2.3).

8.1.3.4. Einbindung und Koordination von Spontanhelfenden

Spontanhelfende haben mit der fortschreitenden Nutzung sozialer Medien erheblich an Bedeutung gewonnen, sodass sich inzwischen sogar eine ISO-Norm der Bereitstellung eines „Leitfadens für die Planung der Einbindung spontaner freiwilliger Helfer“ gebildet hat (ISO 22319:2017). Im Rahmen einer eigenständigen Maßnahme im Aktionsplan Anpassung III zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel wird die Anwendung dieser Norm derzeit in der Praxis erprobt. Spontanhelfende sind mit den Strukturen von Feuerwehren und Hilfsorganisationen in der Regel nicht vertraut, können aber bei den Aufräumarbeiten dennoch sehr gut unterstützen und haben durchaus auch einen positiven psychologischen Effekt auf die betroffene Bevölkerung. Die koordinierte Eingliederung der Bereitschaftshelferinnen und Helfer in die Einsatzstrukturen ist dabei grundle-

gend für eine effektive Unterstützung. Analog zu den überörtlichen Unterstützungskräften bedarf es zumindest einer bekannten Anlaufstelle, an die sich Hilfwillige wenden können, an der sie erfasst, eingewiesen und von wo aus sie gezielt an Orte gebracht werden, an denen ihre Hilfe benötigt wird.

Gegenüber sich selbst mobilisierenden Helfergruppen kann es sich nach OTT et al. (2018) auch empfehlen, „das Potential der ungebundenen Helfer durch die Einsatzorganisationen selbst aufzurufen [...], um es zielgerichtet zu nutzen und Fehlsteuerungen und Frustration bei den Helfern zu vermeiden“ (ebd., S.111). So macht etwa Nordwalde bei Ereignissen regelmäßig von Telefonketten Gebrauch, um z. B. Personen für das Befüllen von Sandsäcken zu gewinnen. Einschränkend wird aber auch bemerkt, dass die Aktivierung von Helfer:innen über persönliche Bekanntschaften vor allem ein Vorzug kleinerer Gemeinden sein könnte: *„Nordwalde ist so eine Solidargemeinschaft, das ist ein gewachsener Ort mit so einer Struktur [...], da kennt jeder jeden. Das wird – glaube ich – so in größeren Städten nicht funktionieren.“* (Interview Nordwalde) Für letztere böte sich demnach eher die Ansprache über Rundfunk und soziale Medien an.

Hinsichtlich der zu vergebenden Aufgaben ist zu berücksichtigen, dass Spontanhelfende über keine entsprechende Grundausbildung verfügen und daher nur solche Arbeiten übernehmen dürfen, die sie weder physisch noch psychisch überlasten (OTT et al. 2018). Im Rahmen des Projekts „Resilienz von Einsatzkräften bei eigener Betroffenheit in Krisenlagen“ (REBEKA) wurde u. a. ein umfangreicher Tätigkeitskatalog für Spontanhelfende entwickelt, der mögliche Aufgaben systematisch nach Komplexität bzw. erforderlicher Sachkenntnis listet und als Anhaltspunkt für die Aufgabenzuweisung dienen kann (DREWS 2018).

8.1.4. Maßnahmen der Nachsorge

In der Phase der Nachsorge und des Wiederaufbaus ist vor allem die Reflektion des Dagewesenen von hoher Bedeutung. Sowohl innerhalb der an der Bewältigung beteiligten Organisationen als

auch mit den vom Ereignis Betroffenen sollte eine Nachbesprechung stattfinden, in der die Situation an sich und das eigene Handeln rekapituliert und evaluiert werden. In beiden Fällen können auch Aspekte der psychosozialen Versorgung eine Rolle spielen, denn Starkregenereignisse können Betroffene aufgrund ihrer Wucht und verheerenden Folgen auch in einen Schockzustand versetzen, wonach es das Erlebte zu verarbeiten und nach Wegen des Umgangs zu suchen gilt. Insbesondere wenn, wie im Fall von Braunsbach und Simbach am Inn, ganze Wohnräume von den Fluten zerstört wurden, muss der Bevölkerung eine bekannte Anlaufstelle gegeben sein, an die sie sich zeitnah mit der Bitte um Unterstützung wenden kann. Im Fallbeispiel Nordwalde wurde relativ kurzfristig, d. h. mit einem Abstand von etwa 4 Wochen nach dem Ereignis, eine erste Bürgerinformationsveranstaltung durchgeführt. Eine solche eignet sich auch gut, um die Bürger:innen nochmals für die mit Starkregen einhergehenden Gefahren zu sensibilisieren und über Vorsorge- und Selbstschutzmaßnahmen zu informieren.

Die Zeit bis zur ersten Nachbesprechung mit der Bevölkerung wurde in diesem Fall benötigt, um *„erst mal ein bisschen [zu] sichten, dann Infos zusammen[zu]stellen und auch mal [zu] schauen, was ist da eigentlich passiert, weil das über uns ja hereingebrochen ist“*. Dieses interne Sichten hat für die Nachbereitung einen ebenso hohen wie praktischen Stellenwert, da eine gründliche Evaluation effektiv auch der besseren Vorbereitung auf zukünftige, ähnlich gelagerte Schadensereignisse dient, indem etwa Negativpunkte erkannt und in der Folge behoben werden. In Nordwalde wurde dazu „aus Reihen der Verwaltung und der Feuerwehr ein Arbeitskreis gegründet, der zum Ziel hatte, diese beiden Tage im August 2010 objektiv und nachhaltig aufzubereiten“ (SCHRÖER 2021). In diesem Rahmen wurden Erkenntnisse gesammelt und in umfassende präventive Maßnahmen überführt, aufgrund derer bei einem weiteren, ähnlich intensiven Starkregenereignis einige Jahre später nur noch wenige Einsätze notwendig waren.

8.1.5. Fazit zu den Maßnahmen im Bevölkerungsschutz

Aus der Auflistung der vorgestellten Handlungsoptionen wird deutlich, dass sich ein großer Teil der Maßnahmen zum Umgang mit Starkregen im Bereich der Prävention und Vorbereitung wiederfindet. Diese Feststellung wird durch die Untersuchung von KUTSCHKER (2018) gestützt: „Aus Sicht der Feuerwehr besteht [...] ein Interesse, den Fokus bei den Anpassungsmöglichkeiten nicht ausschließlich auf die Bekämpfung der Folgen von Unwetter, Starkregen und Überschwemmungen zu legen und lediglich eine Weiterentwicklung der Schadensabwehr zu betreiben. Es muss stattdessen primär die Schadensvermeidung durch präventive Maßnahmen in den Vordergrund gestellt werden“ (ebd., S. 136). Als sinnvoll und wirtschaftlich sind dabei vorwiegend Lösungen zu betrachten, „die die vorhandenen Ressourcen der einzelnen Gebietskörperschaften nutzen und im Bedarfsfall über festgelegte Einsatzpläne und gesetzliche Regelungen mit überörtlichen Material- und Kräfteressourcen sowie Spezialgeräten des Katastrophenschutzes ergänzen“ (ebd., S. 124). Um diese Maßnahmen zu realisieren, bedarf es eines engen, interdisziplinären Geflechts aus Akteuren der Kommunal- und Landesverwaltung, aber auch interkommunal und über Landesgrenzen hinweg kommt dem reinen Erfahrungsaustausch eine große Bedeutung bei der Entwicklung geeigneter Präventionsmaßnahmen zu. In der Notwendigkeit zur stärkeren Vorplanung scheint demnach die eigentlich „neue“ Herausforderung für den Katastrophenschutz im Umgang mit dem Ereignistyp Starkregen zu liegen. Wenn diese erweiterten Strukturen jedoch erst einmal etabliert sind, können sie sich – so die Annahme – auch einer Häufung und Intensivierung der Ereignisse gegenüber als robust erweisen.

8.2. Maßnahmenvorschläge für die Stadtentwicklung

Die folgenden Maßnahmenempfehlungen für die Stadtentwicklung basieren in erster Linie auf der Analyse von Einflussfaktoren bezüglich der Bildung von Einsatzschwerpunkten (Kapitel 7) und

werden durch die meteorologischen Auswertungen des Ereigniskatalogs (Kapitel 5) gestützt. Da in den letzten Jahren bereits eine Vielzahl umfangreicher Leitfäden und Strategien mit Empfehlungen zum Umgang mit Starkregen an Kommunen sowie Bürger veröffentlicht wurde (z. B. IBH RHEINLAND-PFALZ & WBW 2013, BBSR 2015, BBK 2015, LAWA 2018, UBA 2019b, HOY et al. 2020), soll an dieser Stelle statt ausführlich dargelegter Maßnahmen eher eine summarische Betrachtung auf Basis der Projektergebnisse erfolgen.

Ausgangspunkt der Überlegungen sind die folgenden Projektergebnisse:

- a. **Meteorologische Ergebnisse:** In der Betrachtung der Starkregenereignisse der vergangenen 19 Jahre von 2001 bis 2019 zeigte sich eine deutschlandweite Betroffenheit (vgl. Abbildung 4). Während lang anhaltende Niederschläge (Dauerregen) stärker an die Orografie gebunden sind, ist mit einem potenziell Schäden verursachenden Starkregenereignis überall in Deutschland gleichermaßen zu rechnen. Die Analyse der Niederschlagsdaten im Hinblick auf den Clausius-Clapeyron-Effekt belegte die Annahme, dass im Rahmen der klimawandelbedingten Temperaturzunahme mit einer Intensivierung extremer Niederschlagsereignisse zu rechnen ist (vgl. Kapitel 5.3.1.1).
- b. **Ergebnisse aus der Zusammenhanganalyse von Niederschlags-, Einsatz- und Geodaten:** Die Einsatzhäufigkeit wurde in allen betrachteten Gebieten maßgeblich von den Siedlungsfaktoren (Einwohnerzahl, Siedlungsgrad, Versiegelungsgrad) und von der Topografie beeinflusst. Einsatzschwerpunkte lagen demnach vor allem in dicht bevölkerten, stark versiegelten Gebieten mit Senken.
- c. **Ergebnisse aus den Interviews mit Feuerwehren und Leitstelle:** Seitens der Interviewpartner wurden darüber hinaus der Kanalnetzkapazität und der Bildung von Oberflächenabfluss sehr hohe Bedeutung für die Bildung von Einsatzstellen zugeschrieben. Die Bebauungsstruktur wurde im Durchschnitt mit einem moderaten bis hohen Einfluss bewertet. Nach Einschätzung der

Experten spielen aber auch nichtgeografische Faktoren wie das Risikobewusstsein und die Selbsthilfefähigkeit der Bevölkerung eine ausschlaggebende Rolle.

Aus diesen Ergebnissen lassen sich verschiedene Schlüsse ziehen, die sich so im Wesentlichen auch mit den in der o. g. Literatur beschriebenen Empfehlungen decken:

1. **Starkregenvorsorge betrifft jede Kommune:** Vor dem Hintergrund, dass Starkregenereignisse an jedem Ort auftreten, enorme Schäden verursachen können und es zudem Hinweise auf eine Zunahme in der Häufigkeit und Intensität der Ereignisse gibt, sollte sich jede Kommune mit dem Thema Starkregen kritisch auseinandersetzen und ein Starkregenrisikomanagement initiieren. Wesentliche Schritte bestehen in der systematischen Analyse von Gefährdungs- und Schadenspotenzialen, der Planung und Umsetzung gezielter Maßnahmen in Abstimmung mit den jeweiligen Akteuren sowie einer regelmäßigen Überprüfung des Status quo (LAWA 2018).
2. **Oberflächlicher Wasserrückhalt ist von entscheidender Bedeutung:** Da Entwässerungssysteme stets eine begrenzte Kapazität haben und ein Ausbau des Kanalsystems meist weder aus wirtschaftlicher Sicht noch angesichts eines begrenzten Platzangebots realisierbar und zielführend ist, muss dem Niederschlagswasser an anderer Stelle Raum gegeben werden, um stärkere Überflutungen zu verhindern. Dafür sollten auch innerorts möglichst viele Versickerungsflächen und Regenwasserrückhaltebereiche gewährleistet sein. Dabei muss es sich nicht zwangsläufig um großräumige Bereiche handeln; auch dezentrale kleinere Flächen, die gänzlich unversiegelt oder nur teilbefestigt sind (z. B. durch wasserdurchlässige Bodenbeläge), können einen positiven Effekt haben (vgl. BBSR 2015). Wenn eine Versickerung von Regenwasser nicht oder nur eingeschränkt möglich ist (z. B. bei schlechten Bodenverhältnissen oder bei geringem Platzangebot in Innenstädten), gilt es Möglichkeiten zu schaffen, mit denen Niederschlagsabflüsse zwischengespeichert und verzögert an das weiterführende Entwässerungssystem abgegeben oder aber auch ganz bewusst als solche in die Siedlungsplanung integriert werden („Schwammstadt“-Prinzip, s. u.). Auch versiegelte oder teilversiegelte Flächen wie Verkehrsflächen oder Spielplätze können unter Beachtung der Verkehrssicherungspflicht im Sinne einer multifunktionalen Flächennutzung als Überflutungsräume genutzt werden (vgl. UBA 2019b). Zudem kann mit einem hohen Grünvolumen der Starkregenabfluss zeitlich verzögert und Regenwasser in der Fläche zurückgehalten werden. Dazu zählt auch Dach- und Fassadenbegrünung.
3. **Senken sollten umsichtig in die Bebauung integriert werden:** Eine Bebauung von Senken muss nicht grundsätzlich vermieden werden, es sollte aber umsichtig mit dem damit verbundenen Überflutungsrisiko umgegangen werden. Möglich ist dies z. B. durch die Einrichtung von Überflutungsmulden, die gezielt als kleine ökologische Naherholungsräume in die Siedlungsplanung integriert werden können (vgl. BBK 2015). Solche Versickerungsmulden können auch mit Bäumen als Baum-Rigolen bepflanzt werden.
4. **Kommunen sollten ihre Bürgerinnen und Bürger (noch stärker) informieren und zur Eigenvorsorge motivieren:** Eine wiederkehrende Bewusstseinsbildung und Information der Bevölkerung über lokale Risiken sowie Möglichkeiten der Eigenvorsorge (bauliche und Verhaltensvorsorge; vgl. BBK 2015, BBSR 2018) sind zentrale Elemente zur Minderung und Verhinderung von Starkregenschäden in Privathaushalten. Die Risikokommunikation kann z. B. mithilfe landesweiter oder lokaler Starkregenrisikokarten erfolgen, die der lokalen Bevölkerung öffentlich – etwa im Internet – zugänglich gemacht werden (vgl. UBA 2019, HOY et al. 2020).
5. **Aus vergangenen Ereignissen kann viel gelernt werden:** „Das Rad nicht immer wieder neu erfinden müssen“ wurde wiederholt als einer der wesentlichen Leitsätze für die Vorbereitung auf Starkregenereignisse im Katastrophenschutz genannt. Er ist in gleicher Weise auf die Stadtentwicklung übertragbar. Der Lerneffekt kann dabei sowohl innerhalb einer

als auch zwischen Kommunen greifen. Die LAWA empfiehlt hierzu eine systematische Dokumentation von Starkregenereignissen, entstandenen Schäden, Schadensursachen und Abhilfemaßnahmen (LAWA 2018). So beschrieben, illustrieren neben den im Projekt bearbeiteten Fallstudien bereits viele weitere in den letzten Jahren ausführlich aufbereitete Fallbeispiele, welche Gefahren und Schäden in urbanen Gebieten auftreten und welche Schutzmaßnahmen ergriffen werden können (vgl. z. B. BBSR 2015, INFRASTRUKTUR & UMWELT PROFESSOR BÖHM UND PARTNER 2016, UBA 2019, SCHRÖOER 2021). Wenngleich in jeder Kommune ein individuelles Risikoprofil zu erstellen ist, können diese Beispiele impulsgebend für ein eigenes Starkregenrisikomanagement sein.

Eine umsichtige Stadtentwicklung kann dabei auch mehrere der genannten Punkte miteinander verbinden, etwa im Rahmen von Integrierten Stadtentwicklungskonzepten (ISEK), in denen konkrete Maßnahmen zur Starkregenvorsorge beispielsweise durch Renaturierung von Bachläufen und Rückhalteräumen erfolgen. Zudem könnte im Rahmen der (Neu-)Gestaltung von Retentionsflächen auch ein Bürgerdialog bezüglich der Notwendigkeit von Vorsorgemaßnahmen gegenüber Starkregen initiiert und darauf hingewiesen werden, dass trotz kommunaler Maßnahmen die Eigenvorsorge von hoher Bedeutung ist. Darüber hinaus ist festzuhalten, dass langfristig insbesondere diejenigen Maßnahmen Erfolg versprechend sind, die auf die zukünftige Klimaentwicklung ausgerichtet sind und dabei mehreren Klimawirkungen zeitgleich begegnen, denn neben Starkregen stellen auch extreme Hitze und Trockenheit die urbanen Regionen vor große Herausforderungen. Gefragt sind also Strategien, die den Umgang sowohl mit einem „Zuviel“ als auch mit einem „Zuwenig“ an Wasser gleichermaßen adressieren und sich auf engem Raum in den Städten realisieren lassen (DOSCH & FISCHER 2019). Rein technische Lösungen der Ableitung durch die Siedlungswasserwirtschaft, etwa im Rahmen des Kanalisationsausbaus, stoßen an ihre Grenzen und sind für einen vollständigen Wasser-rückhalt aus extremen Niederschlagsereignissen

weder aus betrieblicher noch aus wirtschaftlicher Sicht zielführend (vgl. StEB KÖLN o. J.). Der Klimawandel erfordert stattdessen die Strategie einer wassersensiblen Stadtentwicklung, die international als „Sponge City“ – zu Dt.: „**Schwammstadt**“ – beschrieben wird (DOSCH & FISCHER 2019). Hinter diesem Begriff steht das Prinzip, weniger Wasser oberflächlich abzuleiten und in Kanäle zu entsorgen, sondern es stattdessen in der Fläche zu speichern und zu nutzen (BBSR 2018). Dies geschieht durch die dezentrale Rückhaltung von Regenwasser in temporären Speichern wie Mulden und (Baum-)Rigolen, aber auch klassischen Oberflächenspeichern (z. B. Teiche) und zeitweilig überflutbaren Plätzen und Verkehrswegen als multifunktional genutzte Retentionsflächen. Sie verzögern den Abfluss in den natürlichen Wasserkreislauf und reduzieren damit die Gefahr einer Überlastung der Kanalsysteme im Falle von Extremniederschlägen (vgl. BBSR 2015, UBA 2019b). Durch eine intelligente Begrünung der Speichersysteme und Oberflächen kann der „Schwamm“ zudem in Trockenphasen Wasser abgeben und über die Verdunstung des gespeicherten Regenwassers benachbarte Flächen abkühlen. Das gespeicherte Niederschlagswasser hat somit zugleich einen positiven Effekt auf das Stadtklima und wirkt dem städtischen Wärmeinseleffekt entgegen. Das Schwammstadt-Prinzip kann dabei durch Elemente des klimaangepassten Bauens ergänzt werden, das neben dem Objektschutz auch Maßnahmen zum Speichern, Versickern und Verdunsten von Wasser auf Liegenschaften vorsieht (vgl. FAHRION et al. 2019). In der Summe können die genannten Prinzipien als Stadtentwicklungs- und Umbauleitbild für das klimawandelangepasste Siedlungswassermanagement über alle Maßstabsebenen von der Stadt über das Quartier bis hin zur Liegenschaft dienen (DOSCH & FISCHER 2019). Praxishilfen wie die genannten Leitfäden, vor allem aber auch bereits in die Praxis umgesetzte Pilotprojekte und Maßnahmen tragen dazu bei, die Wissensbasis über wirksame Anpassungsoptionen stetig zu erweitern und innovative Ideen zu verbreiten.

Für viele Kommunen mögen erwartete hohe Kosten für die Planung und Umsetzung von Maßnahmen allerdings zunächst abschreckend wirken.

Die Rahmenbedingungen für die Realisierung des Schwammstadt-Prinzips in der kommunalen Planungspraxis sind nach DOSCH & FISCHER (2019) trotz einer Vielzahl geeigneter Maßnahmen, Erkenntnisse und Fördermöglichkeiten, insbesondere der Städtebauförderung, noch verbesserungswürdig. Zwar können städtebauliche Sanierungsmaßnahmen auch heute bereits durch Anforderungen der Klimaanpassung begründet werden. Zur Erfüllung der Fördervoraussetzungen sind allerdings wiederum Konzepte wie Starkregengefahrenkarten erforderlich, für die es an einheitlichen Empfehlungen und auch Fördermöglichkeiten mangelt (vgl. UBA 2019b). Um die Hemmschwelle für die Initiierung von Maßnahmen bei den Kommunen zu senken, sollten finanzielle und beratende Unterstützungsangebote demnach noch besser aufeinander abgestimmt werden.

Auch die Abstimmung und Kooperation zwischen den verantwortlichen Akteuren, etwa zwischen Siedlungswasserwirtschaft und Stadtentwicklung, ist von zentraler Bedeutung.

Welcher Weg von einer Kommune letztlich auch gewählt wird - entscheidend ist, dass Prozesse zu einer Verringerung der Starkregengefährdung angestoßen werden. Die jüngsten Ereignisse haben gezeigt, dass es dabei keine Zeit zu verlieren gilt. Maßnahmen zum Klimaschutz und zur Klimaanpassung sind dabei gleichermaßen bedeutsam und müssen ineinander greifen. Nur durch aktive, zielgerichtete Handlungen lassen sich auch effektive Wirkungen erzielen, die beim nächsten Starkregenereignis Schäden verhindern und damit zu einer substanziellen Entlastung des Katastrophenschutzes beitragen können.



9.

Kapitel

Quelle: DWD

Fazit und Ausblick

Ein Ereigniskatalog als Basis für Extremniederschlagsanalysen

Im Rahmen des Projekts KlamEx wurde zum ersten Mal ein deutschlandweiter Ereigniskatalog mit umfangreichen zusätzlichen Attributen kombiniert und ausgewertet. Hervorzuheben ist dabei, dass extreme Niederschlagsereignisse nach objektiven meteorologischen Kriterien detektiert werden. Grundlage für die Ereignisdetektion sind die flächendeckenden, radarbasierten Niederschlagsinformationen des RADKLIM-Datensatzes. Die Ereignisse werden dabei über einen Referenzpunkt und das zugehörige Ereignispolygon definiert. Jedem Ereignis sind charakteristische Eigenschaften zugeordnet wie Dauerstufe und Fläche, die den Zustand maximaler Extremität beschreiben. Im Rahmen von KlamEx wurden 2 Katalogvarianten ausgewählt: der Katalog W3_Eta, der Niederschlagsobjekte entsprechend der absoluten Niederschlagsmenge definiert, sowie der Katalog T5_Eta, der eine Wiederkehrzeit von 5 Jahren ansetzt. Der Ereigniskatalog umfasst neben ereignisspezifischen Parametern auch unabhängige meteorologische und geografische Attribute. Darüber hinaus sind einzelnen Ereignissen die im Rahmen von KlamEx zur Verfügung gestellten Einsatzdaten von Feuerwehren zugewiesen. Der Ereigniskatalog bildet damit eine fundierte Basis für statistische Analysen im Zusammenhang mit Extremniederschlägen. Die Ereignisdaten liegen zum Zeitpunkt der Berichtserstellung für die Jahre 2001 bis 2019 vor und werden jährlich fortgeschrieben. Die Ereigniskataloge der Version 2021.01 stehen auf dem Open-data-Sever des DWD kostenfrei zur Verfügung (LENGFELD et al. 2021a, LENGFELD et al. 2021b) und sollen ebenfalls jährlich fortgeschrieben werden. Sie wurden darüber hinaus in einem Paper publiziert (LENGFELD et al. 2021c). Die Katalogversion 2020.01, die den KlamEx-Auswertungen zugrunde liegt, kann auf Anfrage bereitgestellt werden. Es ist außerdem geplant, die Hauptergebnisse aus der jährlichen Fortschreibung der radarbasierten Niederschlagsklimatologie RADKLIM sowie aus dem darauf aufbauenden Ereigniskatalog beginnend mit der Fortschreibung 2020 in Form eines Bulletins auf den Internetseiten des Deutschen Wetterdienstes zu publizieren.

Um die Lücke zwischen meteorologischen Ereignissen und Einsätzen infolge des Impakts zu schließen, sind zukünftig Verknüpfungen mit Abflussinformationen – von topografischen Fließpfaden bis hin zu Ergebnissen hoch aufgelöster Abflussmodellierungen – denkbar. Einen Beitrag hierzu liefert das Projekt IVS-Sturzfluten, das derzeit am DWD mit dem Ziel, Karten des Sturzflutrisikos zu erstellen, bearbeitet wird.

Interessant erscheinen in diesem Zusammenhang auch impaktororientierte Ereigniskataloge, die Ereignisse entsprechend ihren Auswirkungen, z. B. auf Basis von Medienberichten, auswählen, also ein anderes, potenziell komplementäres Auswahlverfahren anwenden. In diesem Zusammenhang ist insbesondere der Katalog des HiOS-Projekts zu nennen, der pluviale Hochwasserereignisse listet (KAISER et al. 2021). Der Großteil der Datenmengen stammt aus den Jahren 2000 bis 2017 und besitzt damit eine große zeitliche Überlappung zum RADKLIM-Katalog.

Häufigkeit und potenzielle Trends extremer Niederschlagsereignisse

Die räumliche Verteilung der Extremereignisse bestätigt die Ergebnisse der rasterbasierten Radarklimatologie: Starkregen kurzer Dauerstufen und hohe Wiederkehrzeiten sind in den betrachteten 19 Jahren relativ gleichverteilt in Deutschland aufgetreten. Daraus lässt sich die Schlussfolgerung ziehen, dass überall in Deutschland eine potenzielle Starkregengefährdung besteht. Die letztendliche Gefahr durch Starkregen ist dabei entscheidend von der lokalen Topografie sowie der Urbanisierung abhängig.

Extremereignisse treten zum großen Teil im Sommerhalbjahr auf. Die Anzahl der Extremereignisse unterliegt großen jährlichen Schwankungen. Der Verlauf der Jahre 2001 bis 2019 suggeriert im Mittel einen geringfügig positiven Trend. Aufgrund der Kürze der Zeitreihe können hieraus jedoch zu diesem Zeitpunkt keine Rückschlüsse auf eine potenzielle Änderung im Rahmen des Klimawandels gezogen werden. Um dennoch Aussagen zu klimawandelbedingten Änderungen von Starkregen treffen zu können, erfolgten Untersuchungen des Zusammenhangs zwischen verschiedenen Ereignisattributen und der Umgebungstemperatur.

Die Daten des Ereigniskatalogs wurden hierzu im Hinblick auf eine potenzielle Skalierung der Ereignisattribute mit der Temperatur – den Clausius-Clapeyron-Effekt – analysiert. Die Ergebnisse lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

Auf Basis der vorliegenden Analysen ist im Rahmen der klimawandelbedingten Temperaturzunahme mit einer Intensivierung extremer Niederschlagsereignisse zu rechnen. Dabei nimmt mit steigender Temperatur der Anteil konvektiver Niederschläge auf Kosten stratiformer Niederschlagsfelder zu. Die Extrema der einstündigen Konvektionszellen werden mit steigenden Temperaturen deutlich großflächiger (~2CC-Rate für 99%-Perzentil), etwas intensiver (Sub-CC-Rate) und bilden einen höheren Gesamtniederschlag aus (Super-CC-Rate für p99). Der ereignisbezogene Starkregenindex nimmt sowohl für konvektive als auch stratiforme Niederschlagsereignisse mit der Temperatur zu, im Mittel um 2 Punkte für konvektive und um einen Punkt für stratiforme Ereignisse über den betrachteten Temperaturbereich von 5 bis 25 °C (bzw. 22,5 °C). Die Extremität konvektiver Niederschläge steigt, während die Extremität über alle Dauerstufen aufgrund der Reduzierung der Fläche beim Übergang vom stratiformen zum konvektiven Regime abnimmt.

Im Rahmen des Projekts KlamEx waren die Analysen zu einer potenziellen Änderung der Niederschlagscharakteristik mit der Umgebungstemperatur (Clausius-Clapeyron-Skalierung) wegen mangelnder Datenverfügbarkeit der Temperaturdaten auf die Jahre 2001 bis 2012 beschränkt. Die Auswertungen sollen mit Fortschreibung der TRJ-Basisdaten oder alternativ unter Verwendung hoch aufgelöster Reanalysedaten bis zum aktuellen Jahr erweitert werden.

Extreme Niederschlagsereignisse im urbanen Raum

Der Ereigniskatalog erlaubt die Untersuchung eines potenziellen Stadteffekts auf die räumliche Verteilung extremer Niederschlagsereignisse. Beispielhaft wurden die Ereignisse im Raum Bremen untersucht. Die Analyse deutet darauf hin, dass Starkregenereignisse kurzer Dauerstufen vermehrt im Lee der Stadt auftreten. Für eine belast-

bare Aussage ist es jedoch notwendig, die Beobachtung ursächlich dem Stadteffekt zuzuordnen. Hierzu sind detailliertere Analysen notwendig. Darüber hinaus ist die Anzahl der betrachteten Ereignisse aufgrund der kurzen Zeitreihe noch relativ gering.

Ein Überblick über den Stand der Einsatzerfassung

Mithilfe der durchgeführten Befragung unter Kommunen zur Dokumentation unwetterbedingter Einsätze konnte im Rahmen des Projekts ein Überblick über den derzeitigen Stand der Einsatzerfassung generiert werden. Wenngleich die Ergebnisse aus den Angaben der 182 Teilnehmenden aus 10 Ländern nicht ohne Weiteres auf andere Kommunen übertragbar sind, spiegeln sie doch zahlreiche Gemeinsamkeiten und Unterschiede wider, die Anhaltspunkte für übergreifende Aussagen bieten. Zwar werden überwiegend ähnliche Informationen zu einem Einsatz erfasst, doch die darunterliegenden Kategorien fallen meist unterschiedlich aus. Dies gilt besonders für die Einsatzursache bzw. Einsatzart, die je nach verwendetem Einsatzstichwort eine genauere oder weniger exakte Eingrenzung auf Extremwetter bzw. einen bestimmten Ereignistyp (z. B. Starkregen) erlaubt. Auch die Vielzahl der verwendeten Eingabesysteme sowie eine uneinheitliche Auslegung des Einsatzbegriffs erschweren die Vergleichbarkeit der Einsatzdaten sowohl auf administrativer als auch auf Organisationsebene. Gleichwohl kann das Interesse an der Auswertbarkeit der eigenen Einsatzdaten im Hinblick auf extreme Wetterereignisse unter den Feuerwehren als hoch bezeichnet werden. Vor diesem Hintergrund könnte eine mögliche Weiterentwicklung der Einsatzerfassung auch von praxisnaher Seite angestoßen und mit Expertise hinsichtlich der praktischen Umsetzbarkeit angereichert werden.

Der Zusammenhang zwischen Starkregen und Einsatzgeschehen

Anhand 12 zur Verfügung gestellter Einsatzdatensätze wurde für die jeweiligen Gebiete eine Verknüpfung mit den Daten aus der Ereignisdatenbank durchgeführt. Das Verfahren gestaltete sich aufgrund der unterschiedlichen Struktur der Einsatzdaten als aufwendig, ermöglichte aber

über einen weitestgehend manuell durchgeführten Abgleich von Ereignissen und korrespondierenden Einsätzen eine relativ genaue Zuordnung. In einer explorativen Zusammenhangsanalyse wurden für jedes Einsatzdatengebiet die Anzahl der Ereignisse und die Anzahl der dadurch ausgelösten Einsätze innerhalb des jeweils verfügbaren Zeitraums gegenübergestellt. Trotz bestehender Inkonsistenzen und Einschränkungen aufgrund der Datengrundlage geben die Ergebnisse belastbare Hinweise darauf, dass Jahre mit einer Vielzahl von Ereignissen häufig auch von einer hohen Anzahl an Einsätzen begleitet werden. Allerdings löst nicht jedes über einem besiedelten Gebiet auftretende Ereignis per se auch Einsätze aus. Vielmehr wird der Zusammenhang zwischen Starkregenereignissen und Einsätzen durch eine Vielzahl von Wirkfaktoren moderiert, was die Korrelationsrechnungen zwischen der Anzahl der Einsätze und Ereignisattributen sowie nicht-meteorologischen Parametern belegten. Dabei zeigte sich, dass neben dem Niederschlagsgeschehen selbst besonders die Siedlungsfaktoren ausschlaggebend sind: In Gebieten mit hoher Einwohnerzahl, hohem Siedlungs- und Versiegelungsgrad traten signifikant mehr Einsätze infolge von Starkregen auf als in weniger dicht besiedelten Regionen mit höherem unversiegelten Flächenanteil. Auch die Topografie hat sowohl in Gebieten mit ausgeprägten als auch mit weniger stark hervortretenden Höhenunterschieden einen deutlichen Einfluss, wonach unabhängig von der absoluten Geländehöhe signifikant mehr Einsätze in Senkenlage auftreten. Dabei scheint die Niederschlagsmenge und intensität umso weniger eine Rolle bei der Anzahl der Einsätze zu spielen, je stärker die Topografie einflussgebend ist. Auch wenn der Niederschlagsschwerpunkt außerhalb eines urbanen Gebietes liegt, kann es entsprechend dem Geländeprofil zu einer horizontalen Verlagerung der Wassermassen durch Abflussvorgänge kommen, die in dem Siedlungsgebiet trotz geringerer lokaler Niederschlagssummen Schadens- und Einsatzstellen verursachen.

Über diese eingängigen quantitativen Zusammenhänge hinaus wurde in Experteninterviews auch nach dem Einfluss nicht messbarer Bevölkerungsgrößen gefragt. Dabei wurden das Risiko-

bewusstsein und der Selbsthilfegrad der Bevölkerung als besonders bedeutsame Einflussgrößen auf die Herausbildung von Einsatzstellen hervorgehoben. Tatsächlich konnte in einem untersuchten Fallbeispiel die Zahl der Einsätze allein durch Selbst- und Nachbarschaftshilfe von 350 auf 250 und somit substantiell reduziert werden.

Die Ergebnisse sind dabei aufgrund der reduzierten Datengrundlage nur eingeschränkt auf andere Räume übertragbar und haben allem voran für die untersuchten Gebiete Gültigkeit. Die kombinierte Analyse von Einsatz- und Niederschlagsdaten bietet allerdings großes Potenzial, um die Auswirkungen von Extremereignissen auf das Einsatzgeschehen sichtbar zu machen, bei hinreichend langer Datenreihe Veränderungen in der Ereignis- und Einsatzhäufigkeit feststellen und daraus einen Anpassungsbedarf ableiten zu können. Damit dies sowohl lokal als auch auf übergeordneten Ebenen gelingt, bedarf es einer Datengrundlage, die eine Abbildung dieser Entwicklungen, etwa durch entsprechend eindeutige Einsatzstichworte, ermöglicht. Erst bei einer annähernden Vergleichbarkeit in den Einsatzdaten können auch Aussagen getroffen werden, die für einen größeren Raum Bestand haben.

Handlungsoptionen für die Praxis im Bevölkerungsschutz und in der Stadtentwicklung

Aus den Ergebnissen der Zusammenhangsanalysen zwischen Ereignissen und Einsatzdaten sowie Siedlungsfaktoren wurden Handlungsoptionen für den Bevölkerungsschutz und die Stadtentwicklung abgeleitet. Im Hinblick auf den Katastrophenschutz zeichnet sich dabei ein Schwerpunkt auf Maßnahmen im Bereich der Prävention und Vorbereitung ab. Es wird angenommen, dass gerade die Entwicklung und Anwendung von Konzepten für vorgeplante Einsatzstrukturen und Unterstützungsmöglichkeiten jedweder Art eine große Hilfe bei der zielgerichteten Bewältigung eines Starkregenereignisses darstellen können. Neben der Unterstützung vor Ort wird auch der Bildung interkommunaler Netzwerke eine hohe Bedeutung beigemessen, um Erfahrungen auszutauschen und von geeigneten Bewältigungs- und Anpassungsstrategien anderer Kommunen zu lernen. „Das Rad nicht immer wieder neu erfinden zu müssen“ war

in diesem Zusammenhang ein wiederholt von Praxisseite genanntes Paradigma, das trotz aller individuellen Gegebenheiten jeder Kommune Bestand haben dürfte. Es gilt dabei sowohl für Maßnahmen des Katastrophenschutzes als auch für Maßnahmen in der Siedlungsentwicklung. Zahlreiche in den letzten Jahren erschienene Handreichungen zu einer klimaangepassten Siedlungswasserwirtschaft bieten dafür bereits praktische Unterstützung an. Noch stärker in den Fokus rücken sollte allerdings eine integrierte Perspektive, die Einzelmaßnahmen in ein stimmiges Gesamtkonzept zu überführen vermag. Erfolg versprechend scheinen dabei vor allem solche Maßnahmen, die auf die zukünftige Klimaentwicklung ausgerichtet sind und dabei sowohl einem „Zuviel“ als auch einem „Zuwenig“ an Wasser gleichermaßen begegnen. Das Prinzip der „Schwammstadt“ setzt mit unversiegelten Freiflächen und Entsiegelung, einer dezentralen Regenwasserbewirtschaftung durch den Wasserrückhalt in temporären Speichern und Abflussverzögerung durch hohes Grünvolumen an jener Stelle an. Die somit bewusst integrierten Wasserflächen können als „blaue und grüne Infrastruktur“ nicht nur den Naherholungswert urbaner Räume erhöhen, sondern tragen mit ihrer Kühlwirkung zeitgleich zur Verbesserung des Stadtklimas bei. Ob Starkregen oder Hitze – jede Maßnahme, die geeignet ist, um eine Gefährdung von Menschen und ihrer Lebensumwelt durch Extremwetter zu verringern, entlastet am Ende auch das System Bevölkerungsschutz.

Ansatzpunkte für weitere Untersuchungen zu den Auswirkungen von Extremwetterereignissen im Bevölkerungsschutz

Die geringe Anzahl der für die Projektauswertung zur Verfügung stehenden Einsatzdaten sowie ihre unterschiedliche Struktur bedingen die Tatsache, dass die Ergebnisse der Ereignis-Einsatz-Analysen nur eine eingeschränkte Repräsentativität genießen. Um noch validere Aussagen treffen zu können, bedarf es eines weitaus größeren und in sich vergleichbareren Datensatzes. Ob und gegebenenfalls wie ein politischer Prozess zu einer möglichen Weiterentwicklung der Einsatzerfassung mit dem Ziel einer höheren Datenvergleichbarkeit konkret zu gestalten ist, könnte sich als Fragestellung an das Projekt anschließen.

Da bisher nur die Einsatzdaten der Feuerwehr und des THW für den Vergleich mit meteorologischen Daten herangezogen wurden, böte sich auch eine vergleichbare Untersuchung mit den Einsatzdaten anderer im Bevölkerungsschutz tätiger Organisationen an. Da Einsätze der Hilfsorganisationen allerdings weniger im Kontext von Starkregen, sondern vielmehr bei Hitzeereignissen im Vordergrund stehen, sollte hierbei die Analyse des Einsatzgeschehens im Vergleich zur Lufttemperatur stattfinden.

Nicht zuletzt sollen die für den Katastrophenschutz relevanten Projektergebnisse nochmals gesondert für die betreffenden Organisationen aufbereitet werden und zum einen in eine vollständige Überarbeitung der BBK-Publikation „Klimawandel – Herausforderung für den Bevölkerungsschutz“ einfließen, zum anderen in einer gesonderten Broschüre veröffentlicht werden – der Bedarf scheint in jedem Fall gegeben.

Ansatzpunkte für weitere Untersuchungen zu den Auswirkungen von Extremwetterereignissen im urbanen Raum

Im BBSR wird derzeit in den Projekten „Wie grün sind bundesdeutsche Städte? – Fernerkundliche Erfassung und stadträumlich-funktionale Differenzierung der Grünausstattung von Städten in Deutschland (Erfassung der urbanen Grünausstattung)“ (Laufzeit 11/2018 - 06/2021) sowie „Inwertsetzung von Copernicus-Daten für die Raumbewertung – incora“ (12/2018 - 02/2022) auf Basis von Copernicus Sentinel-2 Satellitenbild-Klassifikationen eine Datenbasis für unterschiedliche Grünbedeckungen und bebaute Flächen für ein bundesweites 10 x 10 m-Raster erarbeitet. Es ist angedacht, diese kleinräumigen Landbedeckungsdatensätze in Verbindung mit KlamEx-Daten und Daten aus INKAR (Indikatoren zur Raumentwicklung) auszuwerten. Damit sollen die Zusammenhänge zwischen Starkregenereignissen sowie siedlungs- und bevölkerungsstrukturellen Merkmalen näher betrachtet werden, um die Informationsgrundlagen für kommunale Überflutungsvorsorge weiter zu verbessern.



10.

Kapitel

Quelle: pixabay/Bru-nO

Literatur

ADELPHI/PRC/EURAC (2015): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Climate Change 24/2015.

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate_change_24_2015_vulnerabilitaet_deutschlands_gegenueber_dem_klimawandel_1.pdf

BARTH, S., MÜLLER-WESTERMEIER, G., LANG, J. (1995): Objektive Wetterlagenklassifikation. Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 197, Offenbach am Main.

BUNDESAMT FÜR BEVÖLKERUNGSSCHUTZ (BABS) (Hrsg.) (2019): Starkniederschläge und Einsatzplanung von Schutz & Rettung Zürich. Studie im Rahmen des National Centre for Climate Services NCCS. Bern.

BUNDESAMT FÜR BEVÖLKERUNGSSCHUTZ UND KATASTROPHENHILFE (BBK) (2015a): Empfehlungen bei Unwetter. Baulicher Bevölkerungsschutz.

BUNDESAMT FÜR BEVÖLKERUNGSSCHUTZ UND KATASTROPHENHILFE (BBK) (2015b): Die unterschätzten Risiken „Starkregen“ und „Sturzfluten“. Ein Handbuch für Bürger und Kommunen.

BUNDESAMT FÜR BEVÖLKERUNGSSCHUTZ UND KATASTROPHENHILFE (BBK) (2019a): Empfehlungen für Gemeinsame Regelungen zum Einsatz von Drohnen im Bevölkerungsschutz. Bonn.

BUNDESAMT FÜR BEVÖLKERUNGSSCHUTZ UND KATASTROPHENHILFE (BBK) (2019b): Klimawandel – Herausforderung für den Bevölkerungsschutz. https://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Mediathek/Publikationen/PiB/PiB-05-klimawandel.pdf?__blob=publicationFile&v=7

BUNDESAMT FÜR BEVÖLKERUNGSSCHUTZ UND KATASTROPHENHILFE (BBK) (2019c): Ratgeber für Notfallvorsorge und richtiges Handeln in Notsituationen. https://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Mediathek/Publikationen/Buergerinformationen/Ratgeber/ratgeber-notfallvorsorge.pdf?__blob=publicationFile&v=15

BUNDESAMT FÜR BEVÖLKERUNGSSCHUTZ UND KATASTROPHENHILFE (BBK) (2019d): Notstromversorgung in Unternehmen und Behörden. https://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Mediathek/Publikationen/PiB/PiB-13-notstromversorgung-unternehmen-behoerden.pdf?__blob=publicationFile&v=8

BUNDESANSTALT TECHNISCHES HILFSWERK (THW) (2014): Katalog der Einsatzoptionen des THW. Bonn. Aufrufbar unter: https://m.thw.de/SharedDocs/Downloads/DE/Hintergrund/katalog_der_einsatzoptionen.pdf?__blob=publicationFile

BUNDESINSTITUT FÜR BAU-, STADT- UND RAUMFORSCHUNG (BBSR) (2015): Überflutungs- und Hitzevorsorge durch die Stadtentwicklung.

BUNDESINSTITUT FÜR BAU-, STADT- UND RAUMFORSCHUNG (BBSR) (2018): Leitfaden Starkregen – Objektschutz und bauliche Vorsorge.

BUNDESMINISTERIUM DES INNERN (BMI) (2011): Schutz Kritischer Infrastrukturen – Risiko- und Krisenmanagement. Leitfaden für Unternehmen und Behörden. <https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/themen/bevoelkerungsschutz/kritis-leitfaden.html>

BUND-LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER (LAWA) (2018): LAWA-Strategie für ein effektives Starkregenrisikomanagement.

BÜSER, T. (2019): Kommunikation von Wetterwarnungen. In: KOX, T., GERHOLD, L. (Hrsg.) (2019): Wetterwarnungen: Von der Extremereignisinformation zu Kommunikation und Handlung. Beiträge aus dem Forschungsprojekt WEXICOM. Forschungsforum Öffentliche Sicherheit, Schriftenreihe Sicherheit, Nr. 25. S. 43-61.

CASTRO, D., EINFALT, T., FRERICHS, S., FRIEDHEIM, K., HATZFELD, F., KUBIK, A., MITTELSTÄDT, R., MÜLLER, M., SELTMANN, J., WAGNER, A. (2008): Vorhersage und Management von Sturzfluten in urbanen Gebieten (URBAS). Aachen.

DEUTSCHER WETTERDIENST (DWD) (2020): Nationaler Klimareport. 4. korrigierte Auflage, Deutscher Wetterdienst, Potsdam, Deutschland, 54 Seiten. Stand Errata 8. Juni 2020.

DEUTSCHER WETTERDIENST (DWD) (o. J.): FeWIS – Das Katastrophenschutzportal. <https://www.dwd.de/fewis>

DEUTSCHES KOMITEE KATASTROPHENVORSORGE E. V. (DKKV) (2016): Newsletter-Sonderausgabe Starkregen in Deutschland. https://www.dkkv.org/fileadmin/DKKV_Newsletter_Juni_2016_Sonderausgabe_Starkregen.pdf

DIE BUNDESREGIERUNG (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Vom Bundeskabinett am 17. Dezember 2008 beschlossen.

DOSCH, F., FISCHER, B. (2019): Die Schwammstadt als Baustein des klimaresilienten Stadtumbaus. In: Transforming Cities 3/2019, S. 34-40.

DREWS, P. (2018): Tätigkeitenkatalog für Spontanhelfende. Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement IAT der Universität Stuttgart. http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-5349235.pdf

DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL (DWA) (2012): Arbeitsblatt DWA-A 531 – Starkregen in Abhängigkeit von Wiederkehrzeit und Dauer; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., 29 Seiten.

EINFALT, HATZFELD, F., WAGNER, A., SELTMANN, J., CASTRO, D., FRERICHS, S. (2009): URBAS: Forecasting and Management of Flash Floods in Urban Areas. Urban Water Journal, 6(5), 369-374, DOI: <https://doi.org/10.1080/15730620902934819>

ELTNER, A., SARDEMANN, H., KRÖHNERT, M., MAAS, H.-G. (2018): Entwicklung eines low-cost Kameraspegels zur Erfassung hydrologischer Extremereignisse. In: Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e. V. (Hrsg.): Publikationen der DGPF, S. 573–583.

ENGEL, P. (2020): Analyse einer Starkregen-Datenbank – zeitliche und räumliche Schwerpunkte in Hessen. Masterarbeit an der Johann Wolfgang Goethe-Universität, Frankfurt am Main.

FAHRION, M.-S., DRAEGER, S., LAKATOS, M., SCHMIDT, T., NICKL, C., BROMBACHER, M., BANGALORE, D., SUNDERMANN, W. (2019): KLIBAU – Weiterentwicklung und Konkretisierung des Klimangepassten Bauens. Endbericht. https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/programme/zb/Auftragsforschung/5EnergieKlimaBauen/2018/klibau/endbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=3

FELDMANN, M. (2019): Bundesstadt geht voran. Starkregen-Gefahrenkarten für Bonn. In: Behörden Spiegel 35, Heft 5.

FEUERWEHR-DIENSTVORSCHRIFT 100 (FwDV 100): Führung und Leitung im Einsatz. Beschlossene Fassung des AFKzV vom 10.03.1999. <https://www.idf.nrw.de/service/downloads/pdf/fwdv100.pdf>

FISCHER, S. (2015): Einsatzdurchführung. In: Brandschutz/Deutsche Feuerwehrzeitung (Hrsg.) (2015): Das Feuerwehr-Lehrbuch. Grundlagen – Technik – Einsatz. Stuttgart. S. 230-258.

FRITSCH, K., ASSMAN, N A., TYRNA, B. (2016): Long-term experiences with pluvial flood risk management. E3S Web of Conferences 7(5): 04017.

GEENEN, E. M. (2017a): Risikokommunikation. In: KARUTZ, H., GEIER, W., MITSCHKE, T. (Hrsg.) (2017): Bevölkerungsschutz. Notfallvorsorge und Krisenmanagement in Theorie und Praxis. Berlin, Heidelberg. S. 138-141.

GEENEN, E. M. (2017b): Krisenkommunikation. In: KARUTZ, H., GEIER, W., MITSCHKE, T. (Hrsg.) (2017): Bevölkerungsschutz. Notfallvorsorge und Krisenmanagement in Theorie und Praxis. Berlin, Heidelberg. S. 306-310.

GEIER, W. (2017): Strukturen, Zuständigkeiten, Aufgaben und Akteure. In: KARUTZ, H., GEIER, W., MITSCHKE, T. (Hrsg.) (2017): Bevölkerungsschutz. Notfallvorsorge und Krisenmanagement in Theorie und Praxis. Berlin, Heidelberg. S. 93-128.

GESAMTVERBAND DER DEUTSCHEN VERSICHERUNGSWIRTSCHAFT E. V. (GDV) (2019): Forschungsprojekt Starkregen, Summary November 2019 <https://www.gdv.de/resource/blob/52868/c6d7ffc/eab5d13fc0f7659496ced6421/forschungsprojekt-starkregen-summary-download-data.pdf>

GESAMTVERBAND DER DEUTSCHEN VERSICHERUNGSWIRTSCHAFT E. V. (GDV), DEUTSCHER WETTERDIENST (DWD) (2020): Forschungsprojekt „Starkregen“ – Fachbericht. <https://www.gdv.de/resource/blob/63746/ac53789625df198043ea0779329b42d9/fachbericht-data.pdf>

GÖWECKR, K., KNAUER, T. (2020): Auswirkungen des Klimawandels auf die Feuerwehr. In: Crisis Prevention 1/2020, o. S. <https://crisis-prevention.de/feuerwehr/auswirkungen-des-klimawandels-auf-die-feuerwehren.html>

HAHN, A., KUFFER, M., MIHALIC, I., MITTAG, S., STRASSER, B. (2020): Grünbuch 2020 zur Öffentlichen Sicherheit. Zukunftsforum Öffentliche Sicherheit e. V. https://zoes-bund.de/wp-content/uploads/2020/12/201130_Gruenbuch_2020_digital-BF.pdf

HERING, T., HELMERICH, J. (2018): Standardisierte Einsatzdokumentation in der psychosozialen Notfallversorgung. In: Notfall + Rettungsmedizin 21, S. 205-211.

HERTLER, M., WARNER, D. (2011): Demografie – nicht nur ein Nachwuchsproblem. In: Brandschutz 9/11, S. 684-691.

HOFMANN, T., HÖBEL, P. (2014): Krisenkommunikation. Konstanz, München.

HOMRIGHAUSEN, K. (2005): Einsatzvorbereitung und Einsatzplanung. In: Redaktion BRANDSCHUTZ/Deutsche Feuerwehr-Zeitung (Hrsg.): Das Feuerwehr-Lehrbuch. S. 195-223.

HOY, A., HÜBENER, H., STECKING, M. (2020): Schäden durch Starkregen vermeiden. Unterstützung für hessische Kommunen. Herausgegeben vom Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie.

HUFF, F. A., CHANGNON, S. A. (1973): Precipitation modification by major urban areas. Bulletin of the American Meteorological Society 54(12), 1220–1232.

HUGENIN, M. F., FISCHER, E. M., KOTLARSKI, S., SCHERRER, S. C., SCHWIERZ, C., KNUTTL, R. (2020): Lack of change in the projected frequency and persistence of atmospheric circulation types over Central Europe. Geophysical Research Letters, 47, DOI: <https://doi.org/10.1029/2019GL086132>

HURSCHMANN, D. (2021): Systematik zur Einsatzdatenerfassung des THW für die Statistik im Bevölkerungsschutz mit einem Fokus auf Extremwetterereignisse zwischen 2006-2018. Bachelor of Engineering im Studiengang Rettungsingenieurwesen an der Fakultät für Anlagen, Energie- und Maschinensysteme der Technischen Hochschule Köln. Unveröffentlicht.

INFORMATIONEN- UND BERATUNGSZENTRUM HOCHWASSERVORSORGE (IBH) RHEINLAND-PFALZ, WBW FORTBILDUNGSGESELLSCHAFT FÜR GEWÄSSERENTWICKLUNG MBH (Hrsg.) (2013): Starkregen - Was können Kommunen tun? https://ibh.rlp-umwelt.de/servlet/is/2024/ibh_starkregen_6.3.2013-final.pdf?command=downloadContent&filename=ibh_starkregen_6.3.2013-final.pdf

INFRASTRUKTUR & UMWELT PROFESSOR BÖHM UND PARTNER (2016): Befragung hessischer Kommunen zu Starkregen und Katastrophenschutz im Rahmen des Projekts „KLIMPRAX – Starkregen und Katastrophenschutz in Kommunen“. Zusammenfassung der Ergebnisse. Darmstadt.

JOHANNITER-UNFALL-HILFE E. V. (JUH) (2016): Das Projekt REBEKA. <http://www.rebeka-projekt.de/>

JUNGHÄNEL, T., ERTEL, H., DEUTSCHLÄNDER, T. (2017): Bericht zur Revision der koordinierten Starkregenregionalisierung und -auswertung des Deutschen Wetterdienstes in der Version 2010, https://www.dwd.de/DE/leistungen/kostra_dwd_rasterwerte/download/bericht_revision_kostra_dwd_2010.pdf?__blob=publicationFile&v=6

KAISER, M., GÜNNEMANN, S., DISSE, M. (2021): Spatiotemporal analysis of heavy rain-induced flood occurrences in Germany using a novel event database approach, *Journal of Hydrology*, 595, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.125985>

KOCH, M., BEHNKEN, K., SCHNEIDER, B., GATKE, D., THIELKING, K., WURTHMANN, J., HOPPE, H., KIRSCHNER, N., BENDEN, J., GERDES, D., (2015): Klima-Anpassungsstrategie Extreme Regenereignisse (KLAS). Schlussbericht des Projektes „Umgang mit Starkregenereignissen in der Stadtgemeinde Bremen“.

KOX, T., GERHOLD, L. (Hrsg.) (2019): Wetterwarnungen: Von der Extremereignisinformation zu Kommunikation und Handlung. Beiträge aus dem Forschungsprojekt WEXICOM. *Forschungsforum Öffentliche Sicherheit, Schriftenreihe Sicherheit*, Nr. 25.

KRÄHENMANN, S. (2017): Handbuch Ortsgenaue Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse, https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/programme/zb/Auftragsforschung/5EnergieKlimaBauen/2013/testreferenzjahre/try-handbuch.pdf;jsessionid=32F96E889EBF9043C884BC440CF32493.live21301?__blob=publicationFile&v=1

KREKTLOW, J., TETZLAFF, B., TA, P. (2019): Ausweisung von starkregengefährdeten Gebieten in Hessen für Planungen zur Gefahrenabwehr auf Landes- und kommunaler Ebene. Abschlussbericht.

KRINGS, S., GLADE, T. (2017): Terminologische Normierungen und Diskussionen. In: KARUTZ, H., GEIER, W., MITSCHKE, T. (Hrsg.) (2017): Bevölkerungsschutz. Notfallvorsorge und Krisenmanagement in Theorie und Praxis. Berlin, Heidelberg. S. 30-54.

KÜHN GEOCONSULTING GMBH (2018): HAPLUS Hierarchisches Frühwarn- und Alarmierungssystem für plötzliche Sturzfluten nach Starkregenereignissen. Projektwebseite. <http://www.haplus.de/>

KUTSCHKER, T., GLADE, T. (2016): Unwetter! Analyse von Einsatz- und Wetterdaten für die lokale Notfallplanung. In: *Notfallvorsorge* 2/2016, S. 21-28.

KUTSCHKER, T. (2018): Auswirkungen von Starkregenereignissen auf die Gefahrenabwehr im Ballungsraum Rhein-Main und mögliche Anpassungsstrategien im Bevölkerungsschutz. Dissertation, Universität Wien.

KUTTLER, W. (1997): Städtische Klimamodifikation. *VDI Berichte* 1330, 87-108.

LAUWE, P. (2018): Integriertes Risikomanagement: Ein strategischer Ansatz für eine intensive Zusammenarbeit im Bevölkerungsschutz. In: *Bevölkerungsschutz* 3/2018, S. 2-5.

LEHMANN, J., COUMOU, D., FRIELER, K. (2015): Increased record-breaking precipitation events under global warming. *Climatic Change* 132 (4), S. 501-515.

LENGFELD, K. (2020): Das Projekt „Starkregen“ Eine Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse des Projekts zum Zusammenhang zwischen Starkregen und versicherten Schäden untersucht von GDV und DWD.

LENGFELD K., KIRSTETTER, P.-E., FOWLER, H. J., YU, J., BECKER, A., FLAMIG, Z., GOURLEY, J. (2020): Use of radar data for characterizing extreme precipitation at fine scales and short durations. *Env. Res. Letters*, 15(8), DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab98b4>

LENGFELD, K., WALAWENDER, E., WINTERRATH, T., WEIGL, E., & BECKER, A. (2021a). *CatRaRE_W3_Eta_v2021.01: Catalogues of heavy precipitation events exceeding DWD's warning level 3 for severe weather based on RADKLIM-RW Version 2017.002 (Version 2021.01) [Data set]*. Deutscher Wetterdienst (DWD). DOI: https://doi.org/10.5676/DWD/CatRaRE_W3_ETA_V2021.01

- LENGFELD, K., WALAWENDER, E., WINTERRATH, T., WEIGL, E., & BECKER, A. (2021b). CatRaRE_T5_Eta_v2021: Catalogues of heavy precipitation events exceeding a return period of 5 years (T5) based on RADKLIM-RW Version 2017.002 (Version 2021.01) [Data set]. Deutscher Wetterdienst (DWD). DOI: https://doi.org/10.5676/DWD/CatRaRE_T5_ETA_V2021.01
- LENGFELD, K., WALAWENDER, E., WINTERRATH, T., WEIGL, E., & BECKER, A. (2021c): CatRaRE: A Catalogue of Radar-based Heavy Rainfall Events in Germany Derived from 19 Years of Data, submitted to Meteorologische Zeitschrift.
- LIU, J., NIYOGI, D. (2019): Meta-analysis of urbanization impact on rainfall modification, *Sci. Rep.* 9, 7301, DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42494-2>
- MANN, M. E., RAHMSTORF, S., KORNUBER, K., STEINMAN, B. A., MILLER, S. K., PETRI, S., COUMOU, D. (2018): Projected changes in persistent extreme summer weather events: The role of quasi-resonant amplification, *Science Advances*, Vol. 4, no. 10, eaat3272, DOI: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat3272>
- MARTINKOVA, M., KYSELY, J. (2020): Overview of Observed Clausius-Clapeyron Scaling of Extreme Precipitation in Midlatitudes, *Atmosphere* 11, 786; DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos11080786>
- MAURER, K. (2005): Zur Notwendigkeit von Alarm- und Ausrückeordnungen -Tipps zur Vorgehensweise. In: *Im Einsatz* 12/2005, 3, S. 11-14.
- MINISTERIUM DES INNERN DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN (2017): Konzept für die „Vorgeplante überörtliche Hilfe im Brandschutz und der Hilfeleistung durch die Feuerwehren im Land Nordrhein-Westfalen“ (VüH-Feu NRW). https://www.idf.nrw.de/service/downloads/pdf/2017-07-04_konzept_vueh_feu_nrw.pdf
- ARMON, M., ENZEL, Y., MARRA, F., MORIN, E., ROSTKIER-EDELSTEIN, D., (2019): Radar-based characterisation of heavy precipitation in the eastern Mediterranean and its represent in a convection-permitting model. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 24(3), 1227-1249, DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-24-1227-2020>
- MOTSCH, J. (2019): *Meteorologie für die Feuerwehr. Die Auswirkungen des Klimawandels auf das Einsatzgeschehen.* Stuttgart.
- MÜLLER, M., KASPAR, M. (2014): Event-adjusted evaluation of weather and climate extremes, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 14, 473-483, DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-14-473-2014>
- MÜLLER-TISCHER, J. (2018): *Handbuch Social Media im Einsatz. Grundlagen, Konzepte, Werkzeuge.*
- MÜLLER, F. (2019): *Unwetterlagen effizient bewältigen. Organisatorische und taktische Hinweise für Feuerwehren.* Stuttgart.
- Niedersächsisches Rettungsdienstgesetz (N RettDG) in der Fassung vom 2. Oktober 2007. <https://www.nds-voris.de/jportal/?quelle=jlink&query=RettDG+ND&psml=bsvorisprod.psml&max=true&reiz=true>
- NIKOGOSIAN, C., WINTERRATH, T. (2019): Extrem gut untersucht? Extremwetter als interdisziplinäres Thema in der deutschen Forschungslandschaft. In: *Bevölkerungsschutz* 2/2019, S. 12-16.
- NIKOGOSIAN, C., FISCHER, I., WINTERRATH, T., WALAWENDER, E. (2020): Klassifikation meteorologischer Extremereignisse zur Risikovorsorge gegenüber Starkregen für den Bevölkerungsschutz und die Stadtentwicklung (KlamEx), Zwischenbericht, https://www.dwd.de/DE/fachnutzer/wasserwirtschaft/kooperationen/klamex/pdf/klamex_zwischenbericht_bbk_dwd_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- NIKOLA, U. (2019): Klimawandel: Herausforderung für Rettungskräfte. In: *Brandwacht* 5/2019, S. 182-183.
- OTT, M., HOFMANN, M. P., BÖGER, N. (2018): *Einsatz bei Extremwetterereignissen.* Landsberg am Lech.
- o. V. (2021): *Erfahrungen nutzbar machen. Bewältigung von Starkregenereignissen.* In: *Behörden Spiegel* 1/2021, S. 38.

- PURR C., BRISSON, E., AHRENS, B. (2019): Convective Shower Characteristics Simulated with the Convection-Permitting Climate Model COSMO-CLM. *Atmosphere*, 10(12), 810, DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos10120810>
- RAHMSTORF, S., COUMOU, D. (2011): Increase of extreme events in a warming world. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108(44), S. 17905-17909.
- RECHENBACH, P. (2017): Information, Warnung und Alarmierung der Bevölkerung. In: Karutz, H., Geier, W., Mitschke, T. (Hrsg.) (2017): *Bevölkerungsschutz. Notfallvorsorge und Krisenmanagement in Theorie und Praxis*. Berlin, Heidelberg. S. 247-255.
- REKLIES-DE ERGEBNISBERICHT (2017): <https://reklies.hlnug.de/fileadmin/tmpl/reklies/dokumente/ReKlies-De-Ergebnisbericht.pdf>
- SANDER, N. (2020): Extreme Aussichten. In: *Feuerwehr-Magazin* 6/2020, S. 86-88.
- SCHMITT, T. G., KRÜGER, M., PFISTER, A., BECKER, M., MUDERSBACH, C., FUCHS, L., HOPPE, H., LAKES, I. (2018): Einheitliches Konzept zur Bewertung von Starkregenereignissen mittels Starkregenindex, *Korrespondenz Wasserwirtschaft* 11 (2), S. 82-88.
- SCHMITZ-KRÖLL, D. (2020): *Einsatzerfahrungen nach Sturzflutereignissen – Entwicklung von Handlungsoptionen für die Vorsorge und Nachsorge*. Masterarbeit an der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.
- SCHRÖER, N. (2021): *Der Nordwalder Weg. Entwicklungsstrategien und Umgang mit Starkregenereignissen am Beispiel einer kleineren, ländlichen Kommune in NRW*. Unveröffentlichtes Dokument der Gemeinde Nordwalde.
- SCHULZE, A., LINDEMANN, A.-K. (2020): Selbstschutz und Risikokommunikation am Beispiel Lebensmittelsicherheit. In: *Bevölkerungsschutz* 2/2020, S. 10-13.
- SPICZAK-BRZEZINSKI, C. von (2019): Löschfahrzeuge im Katastrophenschutz: Das LF 20 KatS. In: *Im Einsatz* 26, Heft 3, S. 46-49.
- STADTENTWÄSSERUNGSBETRIEBE (StEB) Köln (2017): FAQ Starkregen. Aufrufbar unter: <https://www.steb-koeln.de/Redaktionell/ABLAGE/Downloads/Brosch%C3%BCren-Ver%C3%B6ffentlichungen/Hochwasserver%C3%B6ffentlichungen/FAQ-Starkregen-Juli-2017.pdf>
- STADTENTWÄSSERUNGSBETRIEBE KÖLN (StEB KÖLN) (O. J.): Leitfaden für eine wassersensible Stadt- und Freiraumgestaltung in Köln. https://www.steb-koeln.de/Redaktionell/ABLAGE/Downloads/Brosch%C3%BCren-Ver%C3%B6ffentlichungen/Geb%C3%A4udeschutz/FirstSpirit_1489560439762LeitfadenPlanung_ES_140217_web.pdf
- TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN (TU Dresden) (2021): Das Projekt VEREINT. <https://vereintcmtt.webspace.tu-dresden.de/>
- TEPPE, D. (2020): Das „Freiwilligen-vor-Ort-System“ in Nordhessen als Element lokaler Selbsthilfe bei Extremwetterlagen. In: *Bevölkerungsschutz* 2/2020, S. 6-9.
- THIELE, J., KRAUCH, S. (2019): Interkommunale Zusammenarbeit im Brand- und Katastrophenschutz. In: *Brandschutz* 12/19, S. 989-993.
- THORNDahl S., SMITH, J. A.; BAECK, M. L., KRAJEWSKI, W. F. (2014): Analyses of the temporal and spatial structures of heavy rainfall from a catalog of high-resolution radar rainfall fields. *Atmos. Res.*, 144, 111-125, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.03.013>
- Thüringer Verordnung zur Erhebung von Statistiken über den Brandschutz, die Allgemeine Hilfe und den Katastrophenschutz (ThürBrand-StatVO) vom 15. März 2017 https://landesrecht.thueringen.de/bsth/document/jlr-Brand_KatSchStatGTHrahmen
- UMWELTBUNDESAMT (UBA) (2019a): *Monitoringsbericht 2019 zur Deutschen Anpassungsstra-*

tegie an den Klimawandel. Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung.

UMWELTBUNDESAMT (UBA) (2019b): Vorsorge gegen Starkregenereignisse und Maßnahmen zur wassersensiblen Stadtentwicklung – Analyse des Standes der Starkregenvorsorge in Deutschland und Ableitung zukünftigen Handlungsbedarfs.

VOGEL, K., OZTURK, U., RIEMER, A., LAUDAN, J., SIEG, T., WENDI, D., AGARWAL, A., RÖZER, V., KORUP, O., THIEKEN, A. (2017): Die Sturzflut von Braunsbach am 29. Mai 2016 – Entstehung, Ablauf und Schäden eines „Jahrhundertereignisses“. Teil 2: Geomorphologische Prozesse und Schadensanalyse. In: Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 61, 3, S. 163–175.

VOSSSCHMIDT, S. (2016): Rechtsgrundlagen des Bevölkerungsschutzrechtes unter besonderer Berücksichtigung der Bundeskompetenz im Bevölkerungsschutz. In: KUHLMAY, M., FREUDENBERG, D. (Hrsg.): Krisenmanagement – Bevölkerungsschutz. Lehrstoffsammlung. Berlin, S. 389–464.

WAGNER, P. (2002): Bundeseinheitliche Brand- und Feuerwehrstatistik. In: Schadensprisma 4/2002, o.S.

WESTRA, S.; FOWLER, H.; EVANS, J.; ALEXANDER, L.; BERG, P.; JOHNSON, F.; KENDON, E.; LENDERINK, G.; ROBERTS, N. (2014): Future changes to the intensity and frequency of short-duration extreme rainfall. *Rev. Geophys.* 52, 522–555.

WINTERRATH, T., BRENDL, C., HAFER, M., JUNGHÄNEL, T., KLAMETH, A., WALAWENDER, E., WEIGL, E., BECKER, A. (2017): Erstellung einer radargestützten Niederschlagsklimatologie. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 251.

WINTERRATH, T., BRENDL, C., HAFER, M., JUNGHÄNEL, T., KLAMETH, A., WALAWENDER, E., WEIGL, E., BECKER, A. (2018): RADKLIM Version 2017.002: Reprocessed gauge-adjusted radar-data, one-hour precipitation sums (RW) DOI: https://doi.org/10.5676/DWD/RADKLIM_RW_V2017.002

WISCHOTT, V. (2020): Starkregenereignisse und ihre Auswirkungen auf die Gefahrenabwehr –

Analyse von Einflussfaktoren auf das Einsatzgeschehen der Feuerwehr. Masterarbeit an der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.

WRIGHT, D. B., SMITH, J. A., BAECK, M. L. (2014): Flood frequency analysis using radar rainfall fields and stochastic storm transposition, *Water Resour. Res.*, 50, 1592–1615, DOI: <https://doi.org/10.1002/2013WR014224>

ZAISS, H. (1989): Simulation ereignisspezifische Einflüsse des Niederschlag-Abfluß-Prozesses von Hochwasserereignissen kleiner Einzugsgebiete mit Niederschlag-Abfluß-Modellen; Technische Berichte über Ingenieurhydrologie und Hydraulik, Institut für Wasserbau, Technische Hochschule Darmstadt, Nr. 42.

ZEITNER, J., KUHLEBER, H-W., DIETERMANN, J. (2015): Einsatzlehre. Grundlagen für Studium und Praxis. Hilden.

Datenquellen:

FREIWILLIGE FEUERWEHR BAD DOBERAN (O. J.): Einsätze nach Jahren. Abrufbar unter: https://www.feuerwehr-baddoberan.de/index.php?side_id=228&jahr=2021

GADM (2018): GADM data. Aufrufbar unter: <https://gadm.org/data.html> (letzter Abruf: 15.02.2021).



Anhang

11.1. Interviewleitfaden

Organisation der Feuerwehr

- Anzahl der Einheiten im Stadt-/Gemeindegebiet, Mitglieder insgesamt
- Leitstellenbereich

Vergangenes Ereignis und dessen Bewältigung

Falls noch Bezug zum konkreten Ereignis vorhanden:

- Wie hat sich das Ereignis im Stadt-/Gemeindegebiet ausgewirkt? Spiegelten sich die besonders betroffenen Bereiche in den Einsatz-Hotspots wider?
- Traten bei der Bewältigung des Ereignisses besondere Herausforderungen auf (z. B. Eigenbetroffenheit)?
- Was lief gut bei der Ereignisbewältigung (seitens der Feuerwehr/Verwaltung)?
- Was lief weniger gut?

Falls kein Bezug zum konkreten Ereignis vorhanden:

- Gibt es Stadtbereiche, die bei Starkregenereignissen regelmäßig betroffen sind? Spiegeln sich diese Bereiche in den Einsatz-Hotspots wider?
- Welche Schwierigkeiten treten regelmäßig bei der Bewältigung von Starkregenereignissen auf (z. B. Eigenbetroffenheit)?
- Welche Abläufe/Handlungen/Maßnahmen funktionieren üblicherweise reibungslos?

Prävention/Vorbereitung auf zukünftige Ereignisse

Identifizierung von Risiken/Einflussfaktoren auf den Zusammenhang zwischen Ereignis und Einsatzgeschehen

- Wodurch kommen Ihrer Meinung nach die Einsatzschwerpunkte bei dem besagten Ereignis (allgemein: bei Starkregenereignissen über dem Stadtgebiet) zustande? Hat es hier einfach nur „besonders viel geregnet“ oder welche Einflussfaktoren könnten eine Rolle gespielt haben?
- Wie hoch schätzen Sie den Einfluss folgender Faktoren auf die Bildung von Einsatzstellen infolge eines Starkregenereignisses ein?

Einflussfaktor	Stärke des Einflusses [0: kein Einfluss – 1: schwacher Einfluss – 2: mittlerer Einfluss – 3: starker Einfluss – 4: sehr starker Einfluss – x: keine Beurteilung möglich]					
a) Physische Faktoren (Ereignis- und natürliche Umgebungsfaktoren)						
Niederschlagsmenge/-intensität	0	1	2	3	4	x
Bildung von Oberflächenabfluss	0	1	2	3	4	x
Geländeform (Erhebungen und Senken/Hangneigung)	0	1	2	3	4	x
Bodeneigenschaften (Wasserspeicherkapazität)	0	1	2	3	4	x
b) Siedlungsfaktoren						
Kanalnetzkapazität	0	1	2	3	4	x
Besiedlungsdichte	0	1	2	3	4	x
Bebauungsstruktur (Anordnung/Gestaltung von Gebäuden, Freiflächen vs. bebaute Flächen)	0	1	2	3	4	x

Tab. 17: Bewertungsmatrix für Einflussfaktoren auf das Einsatzgeschehen zur Einschätzung durch die Interviewpartner.

Einflussfaktor	Stärke des Einflusses [0: kein Einfluss – 1: schwacher Einfluss – 2: mittlerer Einfluss – 3: starker Einfluss – 4: sehr starker Einfluss – x: keine Beurteilung möglich]					
c) Bevölkerungsfaktoren Anm.: Im Folgenden werden wir immer von „der Bevölkerung“ sprechen; gemeint sind damit nicht nur Privathaushalte, sondern alle potenziell von einem Ereignis betroffenen Menschen, d. h. auch Angehörige öffentlicher Einrichtungen oder Kritischer Infrastruktur-Einrichtungen						
Informationsgrad der Bevölkerung (zu Risiken durch Starkregen und korrektem Verhalten im Ereignisfall)	0	1	2	3	4	x
Risikobewusstsein der Bevölkerung	0	1	2	3	4	x
Vorsorgemaßnahmen der Bevölkerung	0	1	2	3	4	x
Rechtzeitige Warnung der Bevölkerung	0	1	2	3	4	x
Selbsthilfefähigkeit der Bevölkerung	0	1	2	3	4	x
soziodemografische und sozioökonomische Merkmale (z. B. Alter, Einkommenshöhe, Bildungsgrad)	0	1	2	3	4	x

Fortsetzung Tab.17: Bewertungsmatrix für Einflussfaktoren auf das Einsatzgeschehen zur Einschätzung durch die Interviewpartner.

2.2 Anpassung

- Würden Sie im Nachhinein sagen, dass Sie auf ein solches Ereignis (allgemein: auf vergangene Starkregenereignisse) gut vorbereitet waren? Falls ja, woran lag das? Falls nein, was hat gefehlt?
- Hat Ihre Feuerwehr, ggf. in Abstimmung mit anderen (z. B. Kreis, Land, Leitstelle), nach dem Ereignis (allgemein: nach vergangenen Ereignissen) Anpassungen vorgenommen, um künftig für solche Ereignisse besser gewappnet zu sein? (bspw. in Ausstattung, Einsatzplanung, Warnung, Alarmierung, Kommunikationswegen, Kooperation mit Nachbarkommunen ...)
- Welche weiteren Maßnahmen für die Anpassung/Vorbereitung auf künftige Ereignisse sind ggf. noch in Planung?
- [Falls nicht bereits erwähnt: Werden die Bewältigung von/Vorbereitung auf Extremwetterlagen auch in Übung und Ausbildung thematisiert? Gibt es ggf. eine spezifische Aus-/Weiterbildung für Einsatz- und Führungskräfte?]
- [Falls nicht bereits erwähnt: Auf welchen Wegen wird das Risiko von Starkregen an die Bevölkerung kommuniziert (im Ereignisfall, aber auch allgemein)? Sehen Sie Anpassungsbedarf in der Risikokommunikation mit der Bevölkerung?]
- Würden Sie sich bei der Vorbereitung auf extreme Wetterereignisse, insbes. Starkregen, mehr Unterstützung wünschen? Falls ja, in welchen Punkten und durch wen?

11.2 Abbildungen und Tabellen

Feld Name	Beispiel	Beschreibung	Datenquelle
CatVersion	T5_Tmax_2021_01	Version des Katalogs	
KEY_FIELD	T5_Tmax_2437	Katalogvariante und Ereignis ID	RADKLIM RW Daten (1h Niederschlagssumme), DOI: 10.5676/DWD/RADKLIM_RW_V2017.002
Event_ID	2437	Ereignis ID	
Start_Time	200208221750	Startzeitpunkt des Ereignisses in UTC (JJJJMMTThhmm).	
End_Time	200208221850	Endzeitpunkt des Ereignisses in UTC (JJJJMMTThhmm).	
Date_START	37490,74306	Datum und Uhrzeit des Ereignisanfangs (DateTime Format)	
Date_END	37490,78472	Datum und Uhrzeit des Ereignisendes (DateTime Format)	
Duration	1	Signifikante Dauerstufe [h] des Ereignisses	
Area	26	Anzahl der betroffenen RADKLIM Pixel	
Area_LAEA	23,9	Fläche [km ²] des Ereignisses (nach LAEA Projektion)	
Area_in_G	26	Anzahl der betroffenen RADKLIM Pixel in Deutschland	
AShare_in_G	100	Anteil der Ereignisfläche [%], die in Deutschland liegt	
RRmax_in_G	1	Information (Ja -1/Nein - 0), ob das Niederschlagsmaximum innerhalb Deutschlands liegt	
x_RRmax	748	X-Wert im RADKLIM-Gitter von RRmax	
y_RRmax	654	Y-Wert im RADKLIM-Gitter von RRmax	
x_RRmaxPRJ	304538	X-Koordinate von RRmax, in stereographischer Projektion (RADKLIM natives Format)	
y_RRmaxPRJ	-4104645	Y-Koordinate von RRmax, in stereographischer Projektion (RADKLIM natives Format)	
AGS_RRmax	12071028	Amtlicher Gemeindegchlüssel von RRmax	
BDL_RRmax	Brandenburg	Bundesland von RRmax	
LKS_RRmax	Spree-Neiße	Landkreis von RRmax	
GMD_RRmax	Briesen	Gemeinde von RRmax	

Hinweis: RADKLIM-Pixel = 1 km² in polarstereographischer Projektion (nicht flächentreu)

Tab. 18: CatRaRE Felder Beschreibung.

Feld Name	Beispiel	Beschreibung	Datenquelle
Eta	4,61	"Extremität: Maß, dass sowohl die Wiederkehrzeit (T) als auch die Fläche (A) eines Ereignisses betrachtet "	RADKLIM RW Daten (1h Niederschlagssumme), DOI: 10.5676/DWD/RADKLIM_RW_V2017.002
RRmax	59	Maximaler Niederschlag [mm] innerhalb der Ereigniszone	
RRmean	34,78	Mittlerer Niederschlag [mm]: Mittelwert der Niederschlagshöhen aller RADKLIM-Pixel innerhalb der Ereigniszone	
Tmax	>> 100	Maximale Wiederkehrzeit [a]: Maximalwert der Wiederkehrzeit innerhalb der Ereigniszone (">100": Wiederkehrzeit > 100 Jahre; ">>100":Wiederkehrzeit > 1000 Jahre)	
Tmean	40	Mittlere Wiederkehrzeit [a]: Mittelwert der Wiederkehrzeiten aller RADKLIM-Pixel innerhalb der Ereigniszone (">100": Wiederkehrzeit > 100 Jahre; ">>100":Wiederkehrzeit > 1000 Jahre)	
SRImax	9	Maximaler Starkregenindex nach Schmitt: Maximalwert des SRI innerhalb der Ereigniszone (Wertebereich [0,12])	
SRImean	5	Mittlere Starkregenindex nach Schmitt: Mittelwert des SRI innerhalb der Ereigniszone (Wertebereich [0,12])	
MPP_flag	0	Information (Ja -1/Nein - 0), ob RRmax höher als 4*100a Niederschlagssumme ist	
WL_START	38	Kennzahl der Wetterlagenklasse am Tag des Ereignisanfangs	
WLc_START	SOZZF	Kennung der Wetterlagenklasse am Tag des Ereignisanfangs	
WL_END	38	Kennzahl der Wetterlagenklasse am Tag des Ereignisendes	
WLc_END	SOZZF	Kennung der Wetterlagenklasse am Tag des Ereignisendes	
V3_RRmax	12	21-tägiger Vorregenindex nach Zeiß im RRmax Pixel	RADKLIM RW Daten (1h Niederschlagssumme), DOI: https://doi.org/10.5676/DWD/RADKLIM_RW_V2017.002
V3_MIN	9	21-tägiger Vorregenindex - Minimum in der Ereigniszone	
V3_AVG	11,3	21-tägiger Vorregenindex - Mittelwert in der Ereigniszone	
V3_MAX	14	21-tägiger Vorregenindex - Maximum in der Ereigniszone	
V4_RRmax	35	30-tägiger Vorregenindex im RRmax Pixel	
V4_MIN	29	30-tägiger Vorregenindex - Minimum in der Ereigniszone	
V4_AVG	34,6	30-tägiger Vorregenindex - Mittelwert in der Ereigniszone	
V4_MAX	41	30-tägiger Vorregenindex - Maximum in der Ereigniszone	
BVLK_RRmax	44	Einwohnerzahl im RRmax Pixel	"Deutschland: Zensus2011 (100-m-Raster), © Statistisches Bundesamt, Wiesbaden 2015; außerhalb Deutschlands: GEOSTAT2011 (1-km-Raster), © Eurostat, EFGS"
BVLK_Summe	3209	Einwohnerzahl in der Ereigniszone	

RADKLIM-Pixel = 1 km² in polarstereographischer Projektion (nicht flächentreu)

Fortsetzung Tab. 18: CatRaRE Felder Beschreibung.

Feld Name	Beispiel	Beschreibung	Datenquelle
BVLK_D1km2	112	Mittlere Bevölkerungsdichte pro 1km ² in der Ereigniszone	GEOSTAT2011 (1-km-Raster), © Eurostat, EFGS
SDL_RRmax	2,8	Siedlungsgrad [%] (Anteil der bebauten Fläche, nur Siedlung) im RRmax Pixel	The European Settlement Map 2016 (100-m-Raster), © European Union, Copernicus Land Monitoring Service 2016, European Environment Agency (EEA)
SDL_GRAD	3,7	Siedlungsgrad [%] der Ereignisfläche (Anteil der bebauten Fläche)	
SDL_MAX	68,7	Maximum von SDL auf einem 100m Gitter innerhalb der Ereigniszone	
VSGL_RRmax	5	Versiegelungsgrad [%]: Prozentsatz der versiegelten Fläche, einschließlich Straßeninfrastruktur	The Imperviousness Density 2015 (100-m-Raster), © European Union, Copernicus Land Monitoring Service 2018, European Environment Agency (EEA)
VSGL_GRAD	4,6	Versiegelungsgrad [%] der Ereignisfläche (Anteil der versiegelten Fläche)	
VSGL_MAX	90	Maximum von VSGL auf einem 100m Gitter innerhalb der Ereigniszone	
CLC_RRmax	211	CORINE Landnutzungs-kategorie im RRmax Pixel	CORINE LAND COVER 2000, 2006, 2012, 2018 - Daten - abhängig von der Zeit des Ereignisses (100-m-Raster), © European Union, Copernicus Land Monitoring Service 2018
CLC_DOMIN	211	dominierende CORINE Landnutzungs-kategorie in der Ereigniszone	
SRTM_RRmax	64	mittlere Höhe [m] über Meeresniveau im RRmax Pixel	SRTM 3 Digital Elevation Model, Void Filled (3-Bogensekunden-Raster), © USGS 2016
SRTM_MIN	53	minimale Höhe [m] über Meeresniveau in der Ereigniszone	
SRTM_AVG	61,4	mittlere Höhe [m] über Meeresniveau in der Ereigniszone	
SRTM_MAX	79	maximale Höhe [m] über Meeresniveau in der Ereigniszone	
TPI_RRmax	0	TPI (Topographic Position Index, 2km circular neighbourhood) [m] - Mittelwert im RRmax Pixel, innerhalb Deutschlands	Deutschland: DGM -Digitales Gelände-modell (50-m-Raster), © GeoBasis-DE / BKG 2015
TPI_MIN	-1,8	TPI (Topographic Position Index, 2km circular neighbourhood) [m] - Minimum in der Ereigniszone, innerhalb Deutschlands	
TPI_AVG	0,2	TPI (Topographic Position Index, 2km circular neighbourhood) [m] - Mittelwert in der Ereigniszone, innerhalb Deutschlands	
TPI_MAX	8,6	TPI (Topographic Position Index, 2km circular neighbourhood) [m] - Maximum in der Ereigniszone, innerhalb Deutschlands	

RADKLIM-Pixel = 1 km² in polarstereographischer Projektion (nicht flächentreu)

Fortsetzung Tab. 18: CatRaRE Felder Beschreibung.

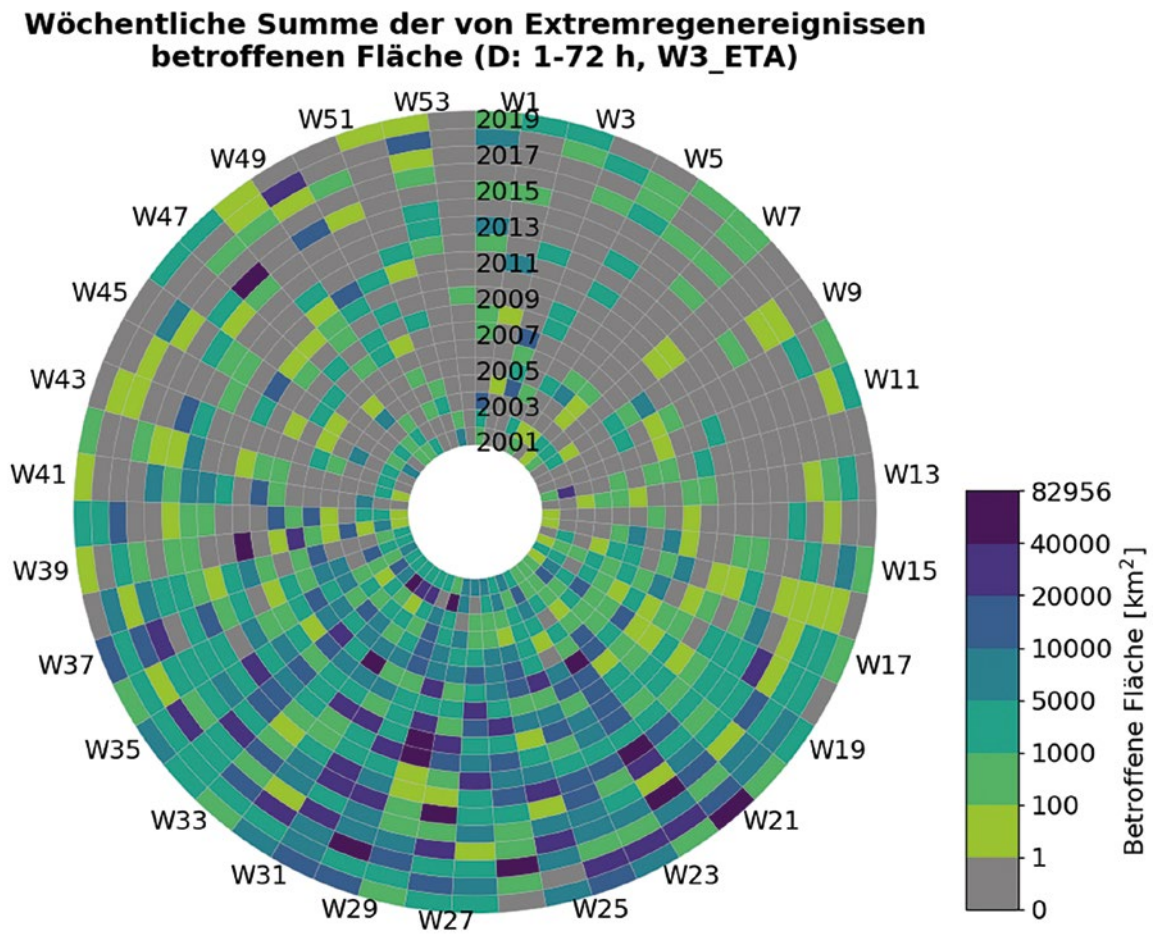


Abb. 96: Wöchentliche Anzahl der Ereignisse von 2001 bis 2019, summiert über alle Pixel des räumlichen Abdeckungsgebiets. Die Ringe zeigen die Jahre von 2001 (innen) bis 2019 (außen) und die Tage des Jahres im Uhrzeigersinn. Die Farben stehen für die Ereignisanzahlen.

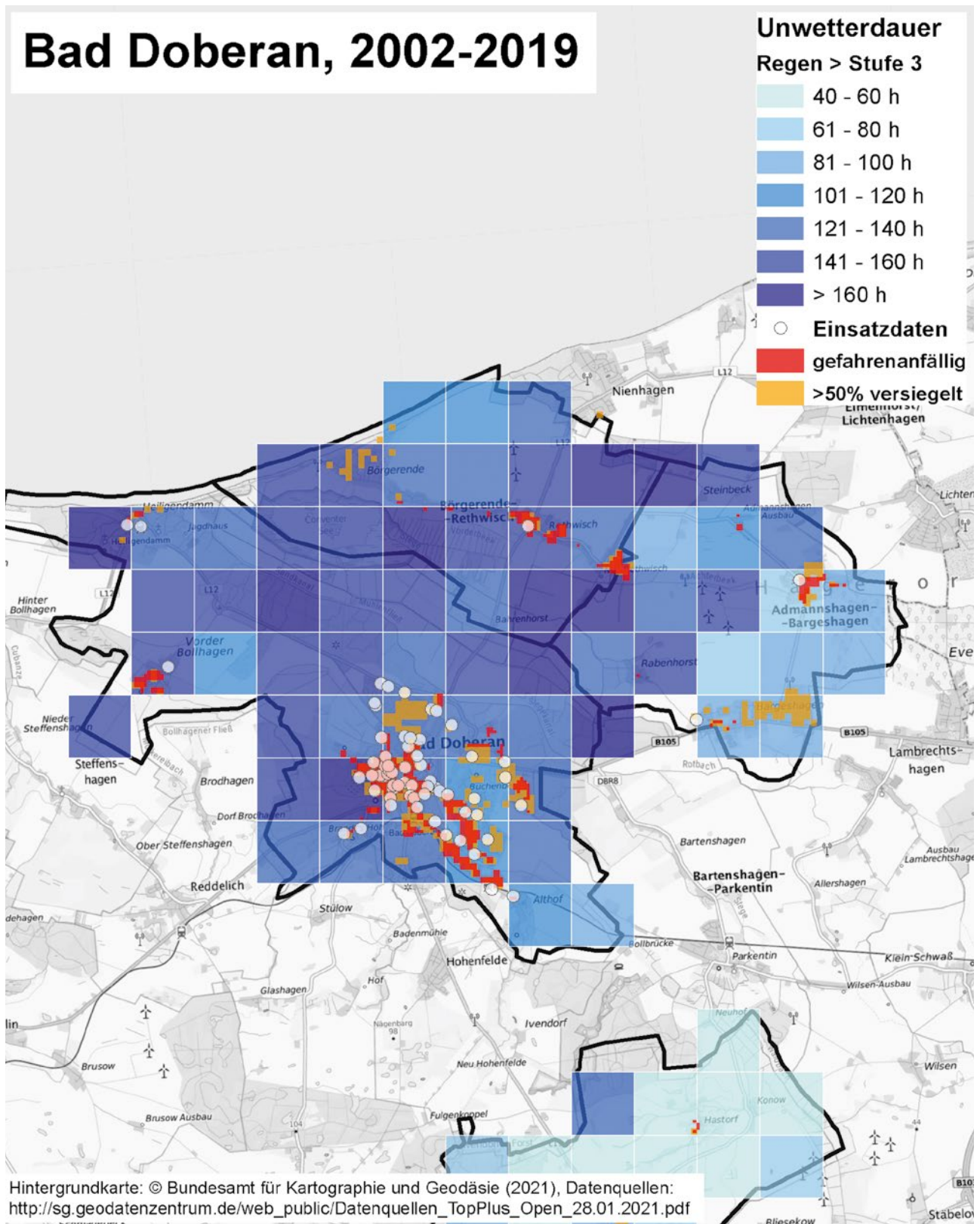


Abb. 97: Erste Abschätzung einer Starkniederschlagsgefahrenkarte für die Stadt Bad Doberan auf der Basis kombinierter Katalogattribute mit hoher Korrelation zu den verfügbaren Einsatzdaten.

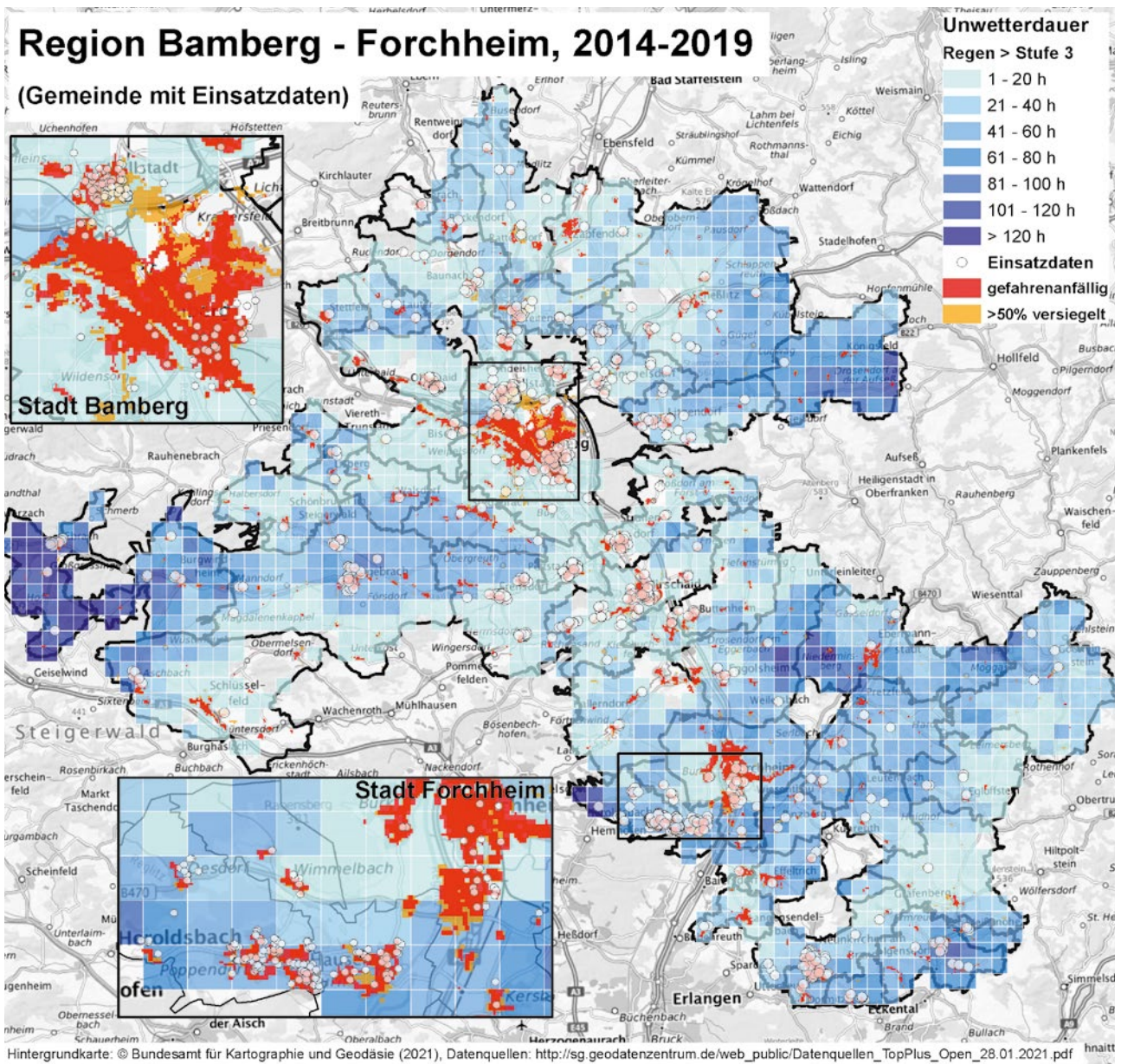


Abb. 98: wie Abbildung 97, aber für die Region Bamberg-Forchheim.

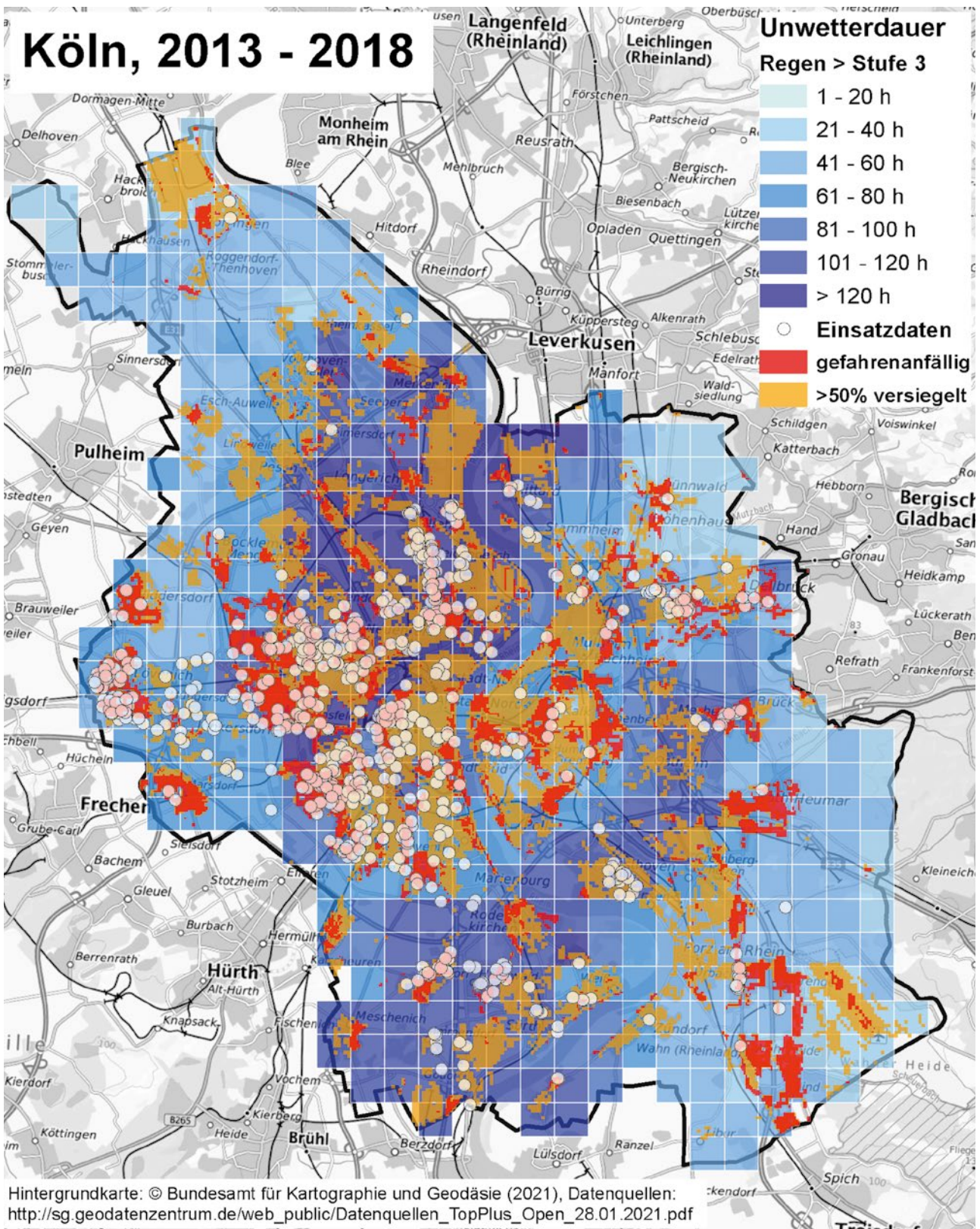


Abb. 99: wie Abbildung 97, aber für die Stadt Köln.

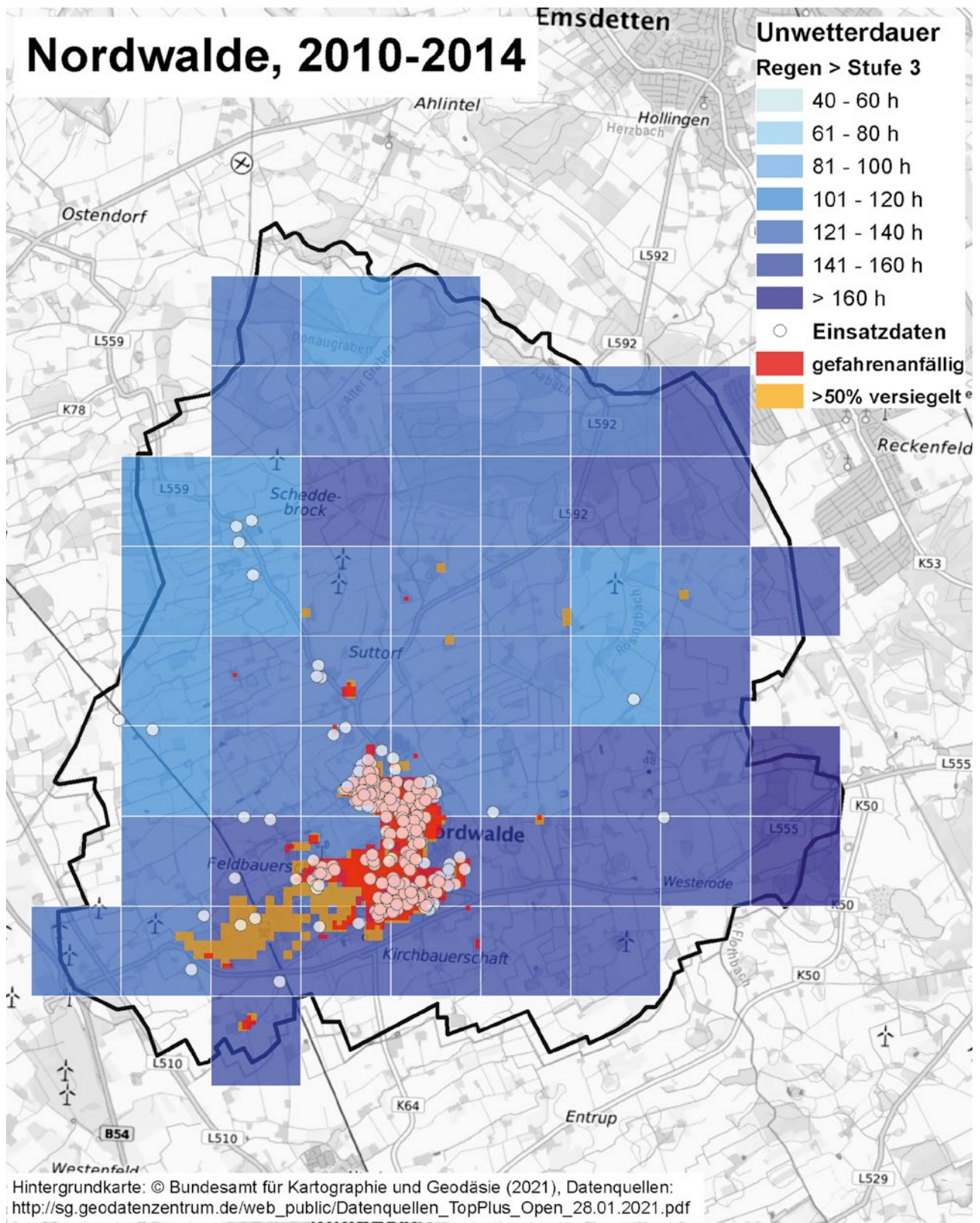


Abb. 100: wie Abbildung 97, aber für die Gemeinde Nordwalde.

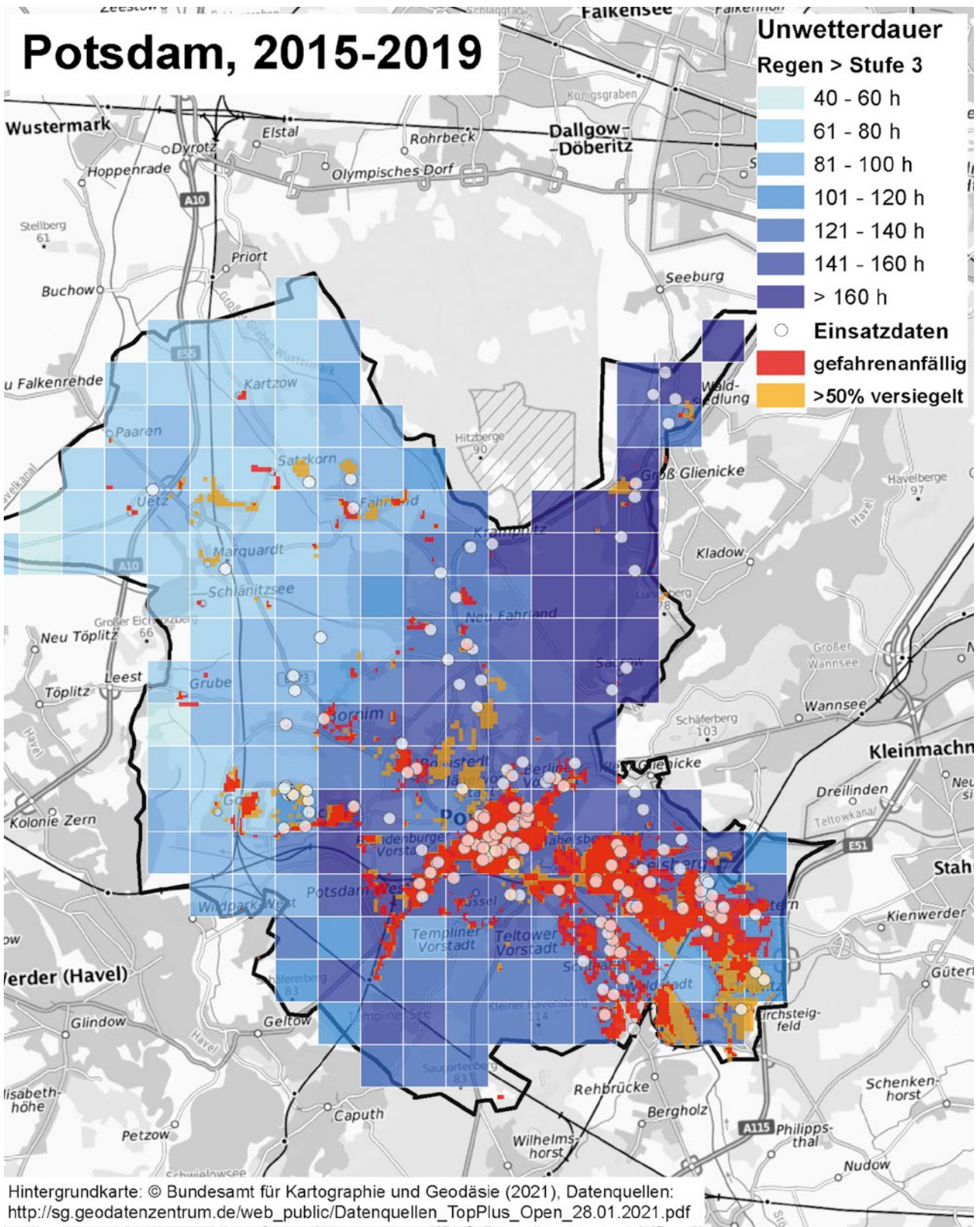


Abb. 101: wie Abbildung 97, aber für die Stadt Potsdam.

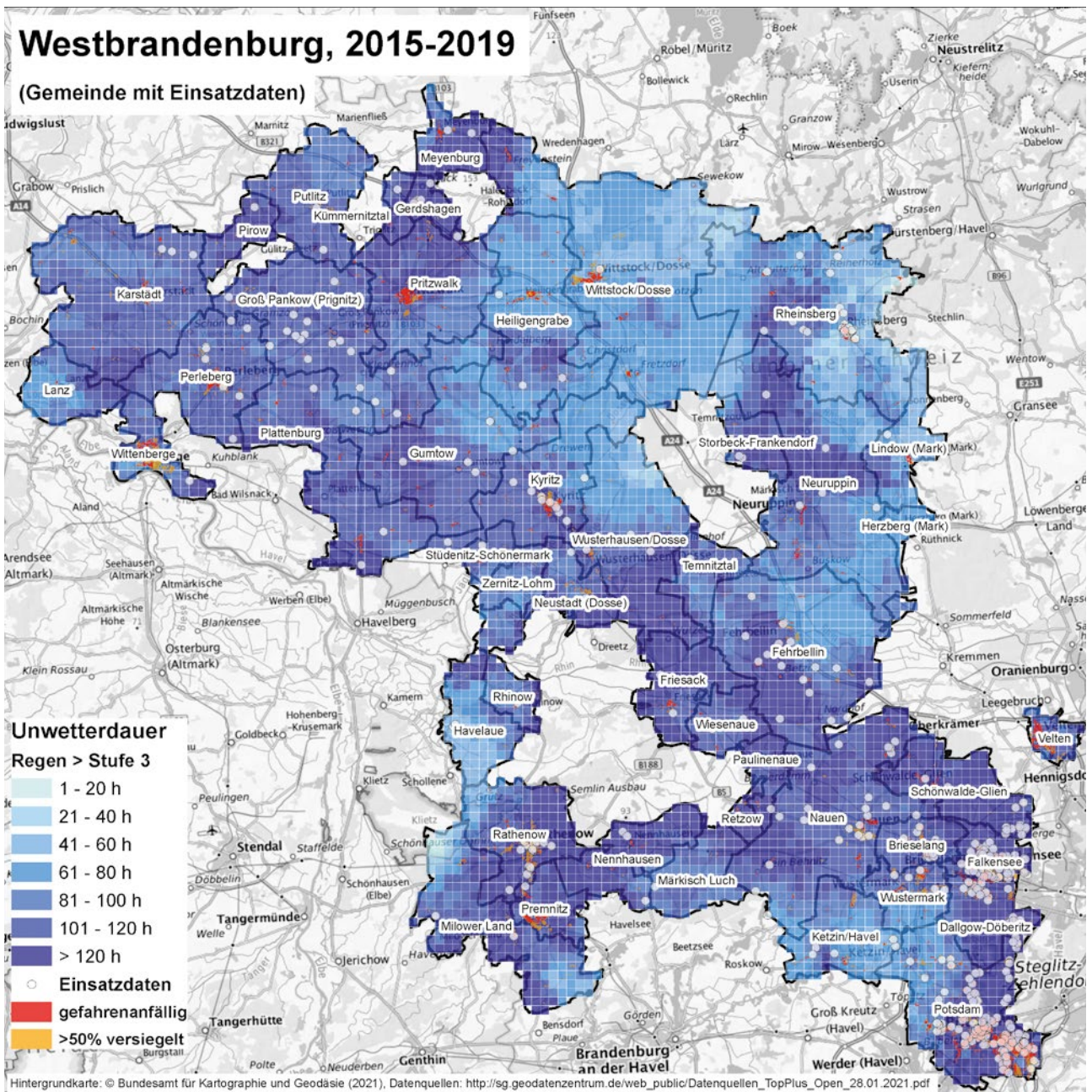


Abb. 102: wie Abbildung 97, aber für die Region Westbrandenburg.

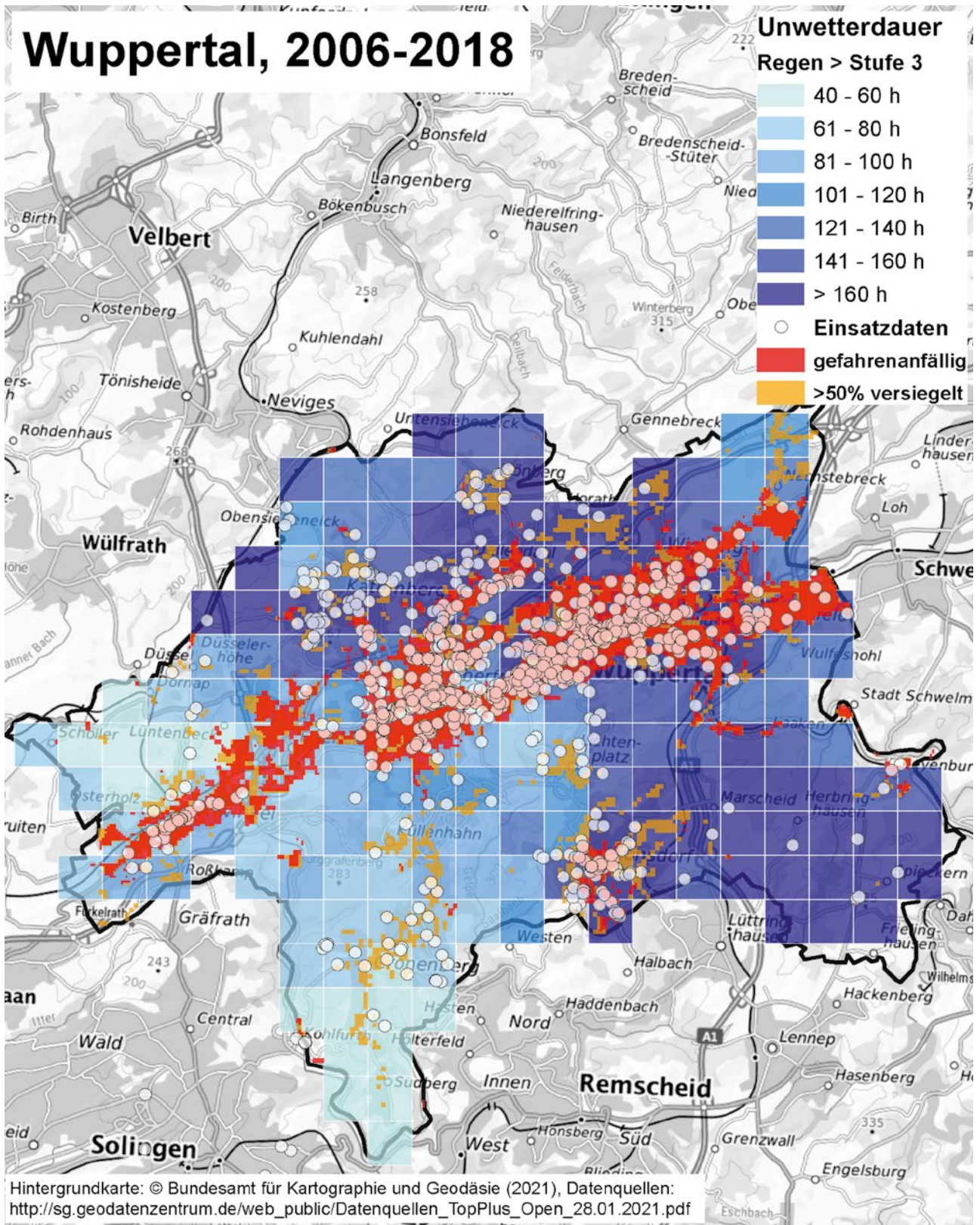


Abb. 103: wie Abbildung 97, aber für die Stadt Wuppertal.

Glossar

∧	Mathematisches logisches UND
2CC-Rate	s. CC-Rate
advektionsarme Wetterlage	Wetterlage mit geringen horizontalen Luftbewegungen
Advektionsrichtung	Richtung der Anströmung einer Luftmasse
Aerosole	Gemisch aus gasförmigen und nichtgasförmigen Substanzen, z. B. feste und/oder flüssige Teilchen in der Luft
Alarm- und Ausrückordnung (AAO)	Die AAO regelt die Alarmierung nach bestimmten Alarmstichworten sowie die jeweils darauf folgenden Alarmreaktionen einer Gemeinde. Sie ist bei der jeweiligen Leitstelle hinterlegt.
angeeichte Niederschlagssummen (RW-Produkt)	Niederschlagsprodukt aus einer Kombination aus Radar- und Stationsmessungen
antizyklonal/zyklonal	Rotation um ein Hoch-/Tiefdruckgebiet; auf der Nordhalbkugel mit dem / gegen den Uhrzeigersinn
antizyklonal/zyklonal	Rotation um ein Hoch-/Tiefdruckgebiet; auf der Nordhalbkugel mit dem / gegen den Uhrzeigersinn
Attribut	Merkmal, hier: Parameter zur Beschreibung der katalogisierten Ereignisse und der Umgebung zum Zeitpunkt ihres Auftretens
Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS)	Staatliche und nichtstaatliche Akteure, die Aufgaben zur Bewahrung und/oder Wiedererlangung der öffentlichen Sicherheit und Ordnung wahrnehmen. Konkret sind dies z. B. die Polizei, die Feuerwehr, das THW, die Katastrophenschutzbehörden der Länder oder die privaten Hilfsorganisationen.
Bemessungsniederschlag	Niederschlagsmenge pro Dauerstufe, die statistisch gesehen innerhalb eines bestimmten Zeitraums an einem bestimmten Ort zu erwarten ist. Grundlage für amtliche Werte sind extremwertstatistische Auswertungen langjähriger stationsbasierter Niederschlagszeitreihen; s. statistischer Niederschlag
Bodentief/Höhenhoch	Gebiete niedrigen/hohen Luftdrucks in unteren/oberen Troposphärenschichten
CC-Rate, 2CC-/Sub-CC-/Super-CC-Rate	Steigerungsrate pro Kelvin Temperaturerhöhung: 7 % (CC), 14 % (2CC), < 7 % (Sub-CC), > 7 % (Super-CC)
charakteristische Dauerstufe (Duration) / Ereignisfläche (Area)	Dauerstufe/Ereignisfläche, die entsprechend der Definition als repräsentativ für das Ereignis angesehen wird
Clausius-Clapeyron-Effekt	Erhöhung der Aufnahmekapazität der Luft bis zur Wassersättigung um 7 % pro Kelvin
Cluster	Gruppen mit einheitlichen Eigenschaften
Clutterstrukturen	fehlerhafte Störsignale im Radarbild, die z. B. durch Windräder hervorgerufen werden
CORINE-Landnutzungsklassen	Coordination of Information on the Environment („Koordinierung von Informationen über die Umwelt“); Klassifikation der wichtigsten Formen der Bodenbedeckung

CSV-Format	Datenformat, Comma-Separated Values
Cumulonimbuswolken	Typ der Wolkenklassifikation, Gewitterwolken
Dashboard	grafische Benutzeroberfläche
Dauerstufe	Zeitintervall, auf das die Niederschlagsmenge bezogen wird; die Dauerstufe ist dabei unabhängig vom meteorologischen Ereignis definiert. Im Ereigniskatalog ist jedem Ereignis eine charakteristische Dauerstufe zugeordnet, für die die Extremität maximal wird.
Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS)	politische Rahmensetzung für die Klimaanpassung in Deutschland, von der Bundesregierung im Dezember 2008 beschlossen. In der DAS werden Aussagen zu beobachteten und erwarteten Klimaänderungen getroffen.
Disposition, hier: Einsatzdisposition	beinhaltet die Entgegennahme und Kategorisierung von Notrufen sowie die Anforderung der dafür notwendigen Einsatzkräfte
doppeltlogarithmischer Ausgleich	Verfahren in der Extremwertstatistik
dynamische / thermodynamische Effekte	Vorgänge aus der Bewegungs- und Wärmelehre
Einsatzstichwort	beschreibt den Auslöser eines Einsatzes. Gebräuchlich sind Unterscheidungen nach Brandeinsätzen, (technischer) Hilfeleistung und Gefahrguteinsätzen, weitere Kategorien nicht ausgeschlossen. Das Stichwort wird bei der Alarmierung entsprechend der zugrundeliegenden Alarm- und Ausrückeordnung der Gemeinde vergeben und ggf. durch ein Schlagwort und/oder Abschlussstichwort ergänzt.
Ereignispolygon	mathematische Figur, die aus dem die charakteristische Ereignisfläche umschließenden Streckenzug gebildet wird
Erosion, hier: Bodenerosion	durch äußere Einwirkung, z. B. Niederschlag, bedingtes Herauslösen von Bodenpartikeln
$E_{t,a}$ -Wert	Extremität, Kombination aus mittlerer Wiederkehrzeit und Fläche als Maß für die Stärke eines Ereignisses
Exponentialverteilung	Extremwertverteilung, hier: zur Bestimmung statistischer Niederschläge auf der Basis von Beobachtungen
Extremität	s. $E_{t,a}$
Extremwetterlage	Wetterlage, die extreme meteorologische Erscheinungen mit sich bringt
Feuerwehrdienstvorschrift (FwDV)	Richtlinien für die Tätigkeiten der Feuerwehr in Deutschland. Sie werden vom Ausschuss Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung (AFKzV) des Arbeitskreises V der Innenministerkonferenz verabschiedet und den Bundesländern zur Einführung empfohlen. Der Inhalt der FwDV kann sich in den einzelnen Ländern entsprechend unterscheiden.
Feuerwehr-Wetter-Informationssystem (FeWIS)	Informationssystem des DWD für die Kundengruppe der Feuerwehren
Flächenlage	Einsatzlage mit mehreren örtlich voneinander getrennten, zeitgleich oder in kurzer Folge auftretenden Einsatzstellen im Zuständigkeitsbereich einer Gefahrenabwehrbehörde
fluviales/pluviales Hochwasser	durch Flüsse/Starkregen verursachtes Hochwasser
Frontendurchgang	Wechsel zwischen zwei Luftmassen
Gefahrenabwehr, nichtpolizeiliche	Maßnahmen des Brand- und Katastrophenschutzes und des Rettungsdienstes entsprechend der Landeskatastrophenschutzgesetze. Sie werden ausgeübt durch die in der Gefahrenabwehr tätigen Behörden und Organisationen (z. B. kommunale Verwaltungs- und Ordnungsämter), die Feuerwehr sowie das THW im Wege der Amtshilfe. Die Gefahrenabwehr umschreibt dabei sowohl abwehrende als auch präventive Maßnahmen.

Geografisches Informationssystem (GIS)	Programm zur Visualisierung und Analyse raumbezogener Daten
Gesamtniederschlag ($RR_{mean} * Area$)	ereignisbezogene Niederschlagsmenge
Gradienten	Verlauf physikalischer Größen
Hotspot	Ort mit erhöhten Werten, z. B. erhöhter Anzahl an Niederschlagsereignissen
Interpolation	Verfahren, um punktbasierte Daten in die Fläche zu bringen
Jetstream	Starkwindbänder in der oberen Troposphäre / unteren Stratosphäre
Katalog T5_Eta	Ereigniskatalog, der die Objekte nach der Wiederkehrzeit bestimmt und nach der Extremität einordnet
Katalog W3_Eta	Ereigniskatalog, der die Objekte nach den Werten der Warnstufe 3 des DWD bestimmt und nach der Extremität einordnet
Kelvin	SI-Temperatureinheit, 0 K markieren den absoluten Nullpunkt (-273,15 °C); wird zur Angabe von Temperaturdifferenzen verwendet
Konvektion	durch Wärme induzierter Auftrieb
Konvektionszelle	durch Konvektion entstandene Wolke
konvektiver Niederschläge	Niederschläge, die durch Konvektion entstehen
Konzeption Zivile Verteidigung (KZV)	Gesamtkonzept der Bundesregierung für die zivile, d. h. nicht-militärische Verteidigung; am 24.8.2016 vom Kabinett beschlossen
Korrelation	mathematischer Zusammenhang zwischen zwei oder mehreren physikalischen Größen
KOSTRA-DWD	Koordinierte Starkniederschlagsregionalisierung – amtliche Bemessungsniederschläge des DWD, die vom Deutschen Wetterdienst kostenfrei zur Verfügung gestellt werden. Grundlage sind langjährige Stationszeitreihen des Niederschlags.
Kritische Infrastrukturen (KRITIS)	Organisationen und Einrichtungen mit wichtiger Bedeutung für das staatliche Gemeinwesen, bei deren Ausfall oder Beeinträchtigung nachhaltig wirkende Versorgungsengpässe, erhebliche Störungen der öffentlichen Sicherheit oder andere dramatische Folgen eintreten würden
labile Schichtung	Zustand, bei dem die vertikale Temperaturabnahme der Atmosphäre größer als die Temperaturabnahme eines aufsteigenden Luftpaketes ist, dieses also eine geringere Dichte als die Umgebung besitzt; Voraussetzung für Konvektion
Leitstelle	mit Disponenten ständig besetzte Führungseinrichtung auf Kreisebene. Sie übernimmt insbesondere die Aufgaben der Annahme von Notrufen und der Alarmierung der zuständigen Einheiten (Fahrzeuge, Personal) der nichtpolizeilichen Gefahrenabwehr. Während des Einsatzes hat sie eine die Einsatzleitung unterstützende und koordinierende Funktion.
Luv/Lee	windzu-/abgewandt
Median	50-%-Perzentil; Wert, der eine mathematische Verteilung in zwei gleichbesetzte Hälften unterteilt
meridionale Verlagerung	Verlagerung in Nord-Süd-Richtung
MESZ	Mitteleuropäische Sommerzeit
mikrophysikalische Prozesse	Prozesse, die die Bildung von Niederschlagsteilchen beschreiben
mittlere/maximale Niederschlagsintensität ($RR_{mean}/Duration$) / ($RR_{max}/Duration$)	mittlere Niederschlagsintensität des Ereignisses über alle Pixel der charakteristischen Ereignisfläche / mittlere Niederschlagsintensität über alle Stunden der charakteristischen Dauerstufe am Pixel des maximalen Gesamtniederschlags

NN	Normalnull, amtliche Bezugshöhe in Deutschland
Opendata-Server des DWD	Server, über den die Bereitstellung der freien Daten des DWDs erfolgt
Orografie	Höhenstrukturen auf der natürlichen Erdoberfläche
Overshooting	Messung oberhalb des Wettergeschehens; z. B. im Fernbereich eines Wetterradars
Persistenz	Erhaltung, hier: lang andauernde, stabile Wetterlage
Perzentile	Werte, die Häufigkeitsverteilungen in Teile bestimmter Besetzung unterteilen, z. B. Median
Pixel	Raster eines Datengitters
planetare Wellen	atmosphärische Zirkulationssysteme, die die Erde umspannen
polarstereografische Projektion	Abbildung einer Kugelfläche in eine Ebene; hier: Verfahren, um Daten auf der Erdkugel in einer Karte darzustellen
Stadtklimaeffekt	klimatischer Effekt aufgrund der spezifischen Eigenschaft von Städten, z. B. Temperaturerhöhung
Proxy	indirekter Anzeiger
Python	Programmiersprache
RADKLIM	RADar-basierte NiederschlagsKLIMatologie; räumlich und zeitlich hoch aufgelöster Niederschlagsdatensatz auf Basis radarbasierter Niederschlagsanalysen für die Jahre 2001 bis (derzeit) 2020 (DWD-Produkt)
RADOLAN	RADar-OnLine-ANEichung; radarbasierte Echtzeitanalysen des Niederschlags (DWD-Produkt)
Randrog	meteorologischer Fachbegriff der Synoptik
Ranking	Ordnen nach der Größe eines Attributs
Reprozessierung	Neuberechnung historischer Datenprodukte
Retentionsfläche	Fläche für den Wasserrückhalt
Rigole	meist unterirdisch verbautes Auffangbecken zur Aufnahme und Versickerung von Regenwasser; bei Baum-Rigolen wird der Speicher um die und unterhalb der Wurzeln angelegt
Sättigungsdampfdruck	Druck, bei dem der gasförmige und der flüssige bzw. feste Aggregatzustand im Gleichgewicht sind
Scherung	Unterschied in Absolutwert und Richtung, z. B. beim Wind
Siedlungsgrad	Relativer Anteil der bebauten Fläche
Signifikanz	statistische Aussagekraft von Daten
skalig	(groß-)flächig; hier: Niederschläge aus großflächigen, nichtkonvektiven Wolken, s. stratiform
SQL-Abfrage (SQL definition query)	Fachbegriff aus der Datenbanksprache
SRI - Starkregenindex	Maß für die Stärke eines Niederschlags
Stadtklimaeffekt	typischer Effekt urbaner Regionen auf meteorologische Parameter, z. B. Temperaturerhöhung

statistischer Niederschlag	Niederschlagsmenge pro Dauerstufe, die statistisch gesehen innerhalb eines bestimmten Zeitraums an einem bestimmten Ort zu erwarten ist; Ergebnis einer extremwertstatistischen Auswertung; s. Bemessungsniederschlag
Strahlungsantrieb	externer Einfluss auf die Energiebilanz der Erde
stratiform	s. skalig
Sub-CC-Rate	s. CC-Rate
Super-CC-Rate	s. CC-Rate
Synoptik	Teilgebiet der Meteorologie, das in einer großräumigen Zusammenschau die Wetterzustände in ihrer räumlichen Verteilung und zeitlichen Änderung für einen gegebenen Zeitpunkt untersucht
Taktische Einheit	Organisatorische Einheit bestehend aus Mannschaft und Einsatzmitteln, die einsatzrelevante Aufgaben selbstständig erledigen kann. Bei den Feuerwehren wird nach folgenden Stärken unterschieden: Trupp, Staffel, Gruppe, Zug, Verband.
Testreferenzjahre (TRJ)	speziell zusammengestellte Datensätze, die einen mittleren, aber für das Jahr typischen Witterungsverlauf repräsentieren
Topografie	Gelände, Erdoberfläche mit natürlichen und künstlichen Objekten
TRJ-Basisdaten	Rasterdaten meteorologischer Größen (spezieller Datensatz des DWDs)
Troposphäre	untere Schicht der Erdatmosphäre, in der sich maßgeblich das Wetter abspielt
Urban Heat Island (UHI) Index	Maßzahl zur Quantifizierung des Stadtklimaeffekts auf die Temperatur, städtische Wärmeinsel
Versiegelungsgrad	relativer Anteil versiegelter Flächen
Vorregenindex/Vorfeuchteindex	Maßzahl für die Sättigung des Bodens aufgrund vorheriger Niederschläge und ggf. Verdunstung
Warnstufe	offizielles Klassifizierungssystem des DWDs zur Warnung vor extremem Wetter
Weather Extremity Index	Maßzahl für die Stärke eines Wetterereignisses
„Weiter-wie-bisher“-Szenario	Klimaszenario ohne weitergehende Anstrengungen zum Klimaschutz; entspricht Szenario RCP 8.5 des IPCC
Wetterlage	klassifizierte, großräumige Wettersituation
Wiederkehrzeit	Zeitraum, in dem statistisch betrachtet ein Niederschlagsereignis bestimmter Größe und Andauer einmal auftritt
Wochenzahl (WZ), hydrologische	Maßzahl zur Berücksichtigung der Jahreszeit in hydrologischen Berechnungen
Zellverfolgungsalgorithmus	mathematisches Verfahren zur zeitlichen und räumlichen Verfolgung konvektiver Zellen
Zyklonalität, zyklonal	Rotationssinn, der sich aufgrund der Corioliskraft um Druckgebiete einstellt; zyklonal = Drehung um ein Gebiet niedrigen Drucks (auf der Nordhalbkugel gegen den Uhrzeigersinn); antizyklonal = Drehung um ein Gebiet hohen Luftdrucks (auf der Nordhalbkugel im Uhrzeigersinn); s. antizyklonal

Impressum:

Herausgeber
Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK)
Provinzialstraße 93,
53127 Bonn Postfach 18, 6753008 Bonn

Telefon: +49 (0) 228 99 550-0
Telefax: +49 (0) 228 99 550-1620
E-Mail: poststelle@bbk.bund.de
Internet: www.bbk.bund.de

Redaktionsteam:
Referat II.3 Strategie KRITIS, Cyber-Sicherheit KRITIS: Christina
Nikogosian, Isabelle Fischer und Deutscher Wetterdienst, Abteilung
Hydrometeorologie: Dr. Tanja Winterrath, Ewelina Walawender

Stand:
August 2021

ISBN-Nr: 978-3-949117-07-7

Bildnachweise
Titelfoto: © BBK/Christina Nikogosian
Seite 4: © Mutzberg/BBK
Seite 6: © Bildkraftwerk/DWD

Urheberrechte
Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist nur in den Grenzen des geltenden Urheberrechtsgesetzes erlaubt. Zitate sind bei vollständigem Quellennachweis jedoch ausdrücklich erwünscht. Dieses Werk darf ausschließlich kostenlos abgegeben werden. Weitere Exemplare dieses Buches oder anderer Publikationen des Bundesamtes für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe können Sie gerne beim Herausgeber kostenfrei anfordern.

