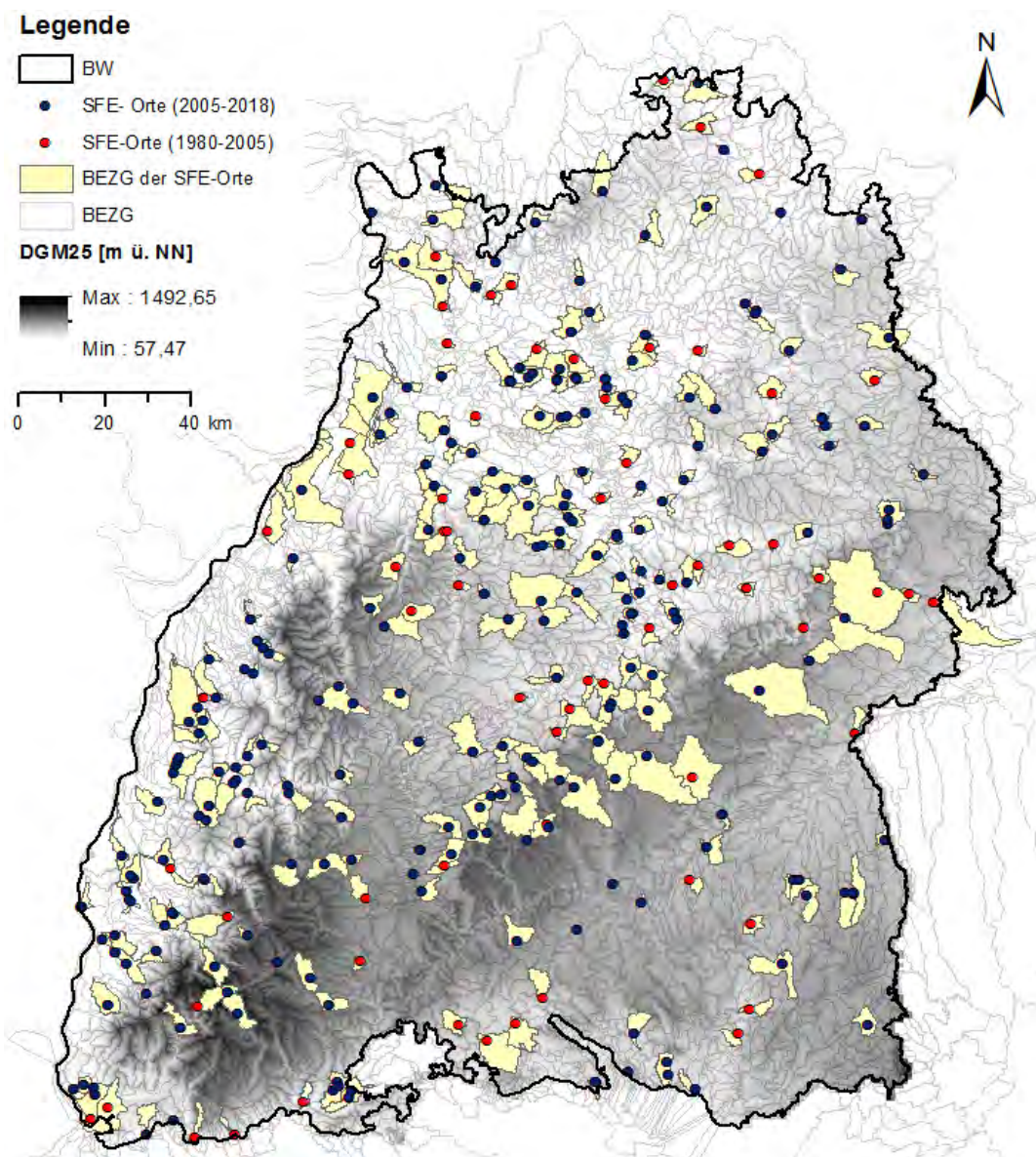


Professur für Hydrologie

der Albert -Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau

Antonia Hengst

Vergleich und Analyse vergangener Sturzflutereignisse und Starkniederschläge in Baden-Württemberg



Masterarbeit unter Leitung von Prof. Dr. Markus Weiler

Freiburg im Breisgau, Juni 2019

Professur für Hydrologie

der Albert -Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau

Antonia Hengst

Vergleich und Analyse vergangener Sturzflutereignisse und Starkniederschläge in Baden-Württemberg

Referent: Prof. Dr. Markus Weiler

Korreferent: JProf. Dr. Andreas Hartmann

Masterarbeit unter Leitung von Prof. Dr. Markus Weiler

Freiburg im Breisgau, Juni 2019

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich recht herzlich bei allen bedanken, die mich während der Zeit meiner Masterarbeit in irgendeiner Weise unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Weiler für die Möglichkeit, meine Masterarbeit mit diesem Themenschwerpunkt zu schreiben. Auch danke ich ihm ganz herzlich für die überaus hilfreichen und klärenden Gespräche zu fachlichen Fragen.

Des Weiteren bedanke ich mich herzlich bei Herrn JProf. Dr. Hartmann für die Übernahme des Korreferats und seine sehr wertvollen Hinweise gleich zu Beginn und zum Ende der Arbeit.

Ohne Grundlagendaten wäre es wohl schwierig geworden, daher geht auch ein großer Dank an Herrn Krause und Herrn Steinbrich für die Bereitstellung der Daten.

Ein ganz dickes Dankeschön gebührt zuletzt meiner Familie und meinen Freunden. Danke Euch fleißigen Korrektoren, Diskutanten, Unterstützern, R-Helfern, Mensa-Gehern, ohne Euch wäre es nicht so eine runde Sache geworden!

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Abbildungen im Text	IV
Verzeichnis der Tabellen im Text	VI
Verzeichnis der Abkürzungen und Symbole im Text	VII
Zusammenfassung	IX
Abstract	XI
1. Einleitung	1
2. Stand des Wissens	4
2.1 Starkregen	4
2.1.1 Definition und Charakteristika	4
2.1.2 Erfassung und Einordnung	5
2.1.3 Trends im Auftreten	6
2.1.4 Vorhersage und Management	9
2.1.5 Folgen des SR	10
2.2 Sturzflut	12
2.2.1 Definition und Charakteristika	12
2.2.2 Prozessverständnis und teilhabende Prozesse	15
2.2.3 Trends im Auftreten	18
2.2.4 Methoden der Analyse und Vorhersage	19
2.2.5 Management	23
3. Zielsetzung und Forschungsfragen	25
4. Methoden und Vorgehensweise	27
4.1 Auswahl der Grundlagendaten	29
4.1.1 SFE-Tabelle	29
4.1.2 Radardaten	30
4.1.3 Geodaten	32
4.2 Analyse der Grundlagendaten	34
4.2.1 SFE-Analyse	34
4.2.1.1 Analyse der Ereignisdaten	34
4.2.1.2 Analyse der Radardaten	34
4.2.2 Aufbereitung der Gebietsparameter	39
4.3 Gegenanalyse	40

4.3.1 Ereignisauswahl	40
4.3.2 Analyse der Radardaten/ Aufbereitung der Gebietsparameter	41
4.3.2 Räumliche Analyse	42
4.4 Vergleich der Ergebnisse aus SFE- und Gegenanalyse	43
4.4.1 Varianzanalyse	43
4.4.2 Logistische Regression.....	44
5. Ergebnisse.....	47
5.2 Grundlagendaten	47
5.3. SFE-Analyse.....	47
5.3.1 Analyse der Ereignisdaten.....	47
5.3.2 Analyse der Radardaten	49
5.4 Gegenanalyse	55
5.4.1 Ereignisauswahl	55
5.4.2 Analyse der Radardaten	56
5.4.2 Räumliche Analyse	56
5.5 Vergleich der Ergebnisse aus SFE- und Gegenanalyse	58
5.5.1 Varianzanalyse	58
5.5.2 Logistische Regression.....	62
6. Diskussion.....	68
6.1 Räumliches und zeitliches Auftreten von SF (F1)	68
6.2 SF auslösende SR- Charakteristika (F2)	69
6.2.1 Niederschlagskennwerte EO	69
6.2.2 Niederschlagskennwerte EZG.....	71
6.2.3 Niederschlagszellengrößen	72
6.3 Vergleichbare SRE ohne SFE (F3)	73
6.3.1 Ereignisauswahl	73
6.3.2 Räumliche Analyse	74
6.4 SF-Einflussfaktoren (F4).....	74
6.4.1 Varianzanalyse	74
6.4.2 Logistische Regression.....	75
6.5 Eignung der Radardaten	78
6.6 Präsenz der SF-Thematik	78
6.7 Offene Aspekte.....	79

7. Schlussfolgerung	81
Literaturverzeichnis.....	84

Verzeichnis der Abbildungen im Text

Abbildung 2.1:	<i>Entwicklung des konvektiven Niederschlagsereignisses über Braunsbach (Baden-Württemberg) am 29. Mai 2016 in den drei intensivsten Stunden; Datengrundlage: Stündliche Radarniederschläge (RADOLAN) (Ziese et al., 2016).</i>	5
Abbildung 2.2:	<i>Gesamtanzahl der Niederschlagsstunden, in denen die Warnschwellen des DWD für SR im Zeitraum 2001 bis 2016 überschritten wurden (Winterrath et al., 2017).</i>	7
Abbildung 2.3:	<i>Sturzflutereignis in Simbach (Bayern) am 01.06.2016 (Rutschmann, 2017)</i>	12
Abbildung 2.4:	<i>Bildung von SF, Prozesse: Starkregen (SR), Horton'scher Oberflächenabfluss (HOA), Sättigungsflächenabfluss (SFA), Infiltration (INF), Zwischenabfluss (ZA), Tiefenperkolation (TP), Grundwasserspiegel (GW); Faktoren: Relief, Bodenfeuchte (blaue Ovale), Landnutzung, Versiegelung. Die Ausrufezeichen stehen für Problemaspekte bei SF (Kap. 2.1.5, eigene Darstellung).</i>	18
Abbildung 4.1:	<i>Schematischer Überblick zur verwendeten Vorgehensweise (eigene Darstellung).</i>	28
Abbildung 4.2:	<i>Übersicht des verwendeten RW Produkts und dessen Ausgangsdaten (DWD, 2018e)</i>	31
Abbildung 4.3:	<i>Schematische Darstellung des Vorgehens zur Ermittlung der relativen Flächenmittelabnahme der Niederschlagssummen [%/km]</i>	36
Abbildung 4.4:	<i>Beispiel für Findung des Ortes mit der maximalen N-Summe (Maxort) über den Betrachtungszeitraum (Ereignistag $\pm$ 1 Tag) eines Ereignisses</i>	37
Abbildung 5.1:	<i>Bekannte SFE (1980 - 2018) nach Jahren (Jahre ohne SFE nicht dargestellt), Trennlinie (grau): Ende der Beobachtungszeitreihe von Herrn Krause, Trennlinie (rot): Beginn Radardatenverfügbarkeit</i>	47
Abbildung 5.2:	<i>Häufigkeit der bekannten SFE (1980 – 2018) nach Monaten (Januar – Dezember)</i>	48
Abbildung 5.3:	<i>Häufigkeiten der SF auslösenden SRE nach Tageszeitenklassen am EO: Früher Morgen (1), Morgen (2), Mittag (3), Abend (4) und Nacht (5) (vgl. Kap. 4.2.1.2)</i>	50
Abbildung 5.4:	<i>Ergebnisse der Niederschlagskennwerte für Ereignisdauer, Ereignissumme, Max. N-Stundensumme für EO und MO im Vergleich</i>	51
Abbildung 5.5:	<i>Mittl. N-Intensität [mm/h] und Max. Mittl.N-Intensität [mm/h] für die EO-Ereignisse</i>	53
Abbildung 5.6:	<i>Verhältnissfaktor von Max. Mittl. N-Intensität [mm/h] (V1) und Max. N-Stundensumme [mm/h] (V2) nach EZG-Fläche, 1:1 Linie (rot) von Max. Mittl-N-Intensität und Max. N-Stundensumme</i>	53

- Abbildung 5.7:** Abnahme der mittleren Niederschlagssumme [%] mit zunehmender Entfernung [km] vom Ereignisort zum Zeitpunkt der Max. N-Stundensumme des Ereignisses. 54
- Abbildung 5.8:** Eingrenzung der identifizierten Rasterpixel/ Ereignisse in BW über dem Grenzwert 15 mm/h (links) beispielhaft für das Jahr 2008 ; Ergebnis: Unabhängige Ereignisse nach zeitlicher-/örtlicher Eingrenzung (rechts), bekannte SFE-Orte 2008 in Rot. 55
- Abbildung 5.9:** Darstellung der Max. N-Stundensummen [mm/h] der GE nach Intensitätsklassen für 2008, 2013, 2018 sowie im Gesamtüberblick (unten rechts). DWD SR-Klassifizierung im Vergleich (vgl. Kap. 2.2.1/3) 57
- Abbildung 5.10:** Gruppenvergleich (SFN/ NSFN) der Niederschlagsparameter auf Basis des Gesamtdatensatzes; Parameter: Ereignisdauer (ereignisdauer), Ereignissumme (ereignissumme), Max. N-Stundensumme (max_h), Mittl. N-Intensität (mittl_int), Max. Mittl. N-Intensität (max_mittl_int), N-Flächenmittelabnahme (proz_abn). 59
- Abbildung 5.11:** Gruppenvergleiche (SFE/ NSFE) der Gebietsparameter; Parameter: EZG-Fläche (ezg_flaeche), Mittlere Höhe (MittlHoehe), Mittlere Geländeneigung (MittlSlope), Mittlerer Versiegelungsgrad (MittlVers), Mittlerer Abflusskoeffizient (MittlOAKext), Mittlere Bodenfeuchte (MittlFKps05), Mittlere Fließgeschwindigkeit (MittlFliess) 60
- Abbildung 5.12:** Häufigkeiten der SFE und NSFE im Vergleich nach monatlichem (Januar - Dezember; Trennlinien: Abgrenzung des Betrachtungszeitraums) und tageszeitlichen Auftreten (Früher Morgen (1), Morgen (2), Mittag (3), Abend (4) und Nacht (5)) (vgl. Kap. 4.2.1.2). 62
- Abbildung 5.13:** Korrelationsanalyse nach Spearman für die Parameter der Datentabelle, Richtung und Stärke der Korrelation dargestellt über Punktfarbe und -größe. Parameter: Monat (monat), Tagesszeit (tageszeit), Ereignisdauer(ereignisdauer), Ereignissumme (ereignissumme), Max. N-Stundensumme (max_h), Mittl. N-Intensität(max_mittl_int), N-Flächenmittelabnahme (proz_abn), EZG-Fläche (ezg_flaeche), Mittlere Geländehöhe (MittlHoehe), Mittlere Geländeneigung (MittlSlope), Mittlerer Versiegelungsgrad (MittlVers), Mittlerer Abflussbeiwert (mittlOAKext), Mittlere Bodenfeuchte (MittlFKps05), Mittlere Fließgeschwindigkeit (MittlFliess). 63
- Abbildung 5.14:** Mit LR-Modell vorhergesagte Wahrscheinlichkeiten (aufsteigend aufgetragen) für die Ereignisse des TRAIN-Datensatzes mit Bezug zur realen Ereignisausprägung SF ja (1)/ SF nein (0) und dem Schwellenwert 65
- Abbildung 5.15:** Mit LR-Modell vorhergesagte Wahrscheinlichkeiten (aufsteigend aufgetragen) für die Ereignisse des TEST-Datensatzes mit Bezug zur realen Ereignisausprägung SF ja (1)/ SF nein (0) und dem Schwellenwert 66
- Abbildung 5.16:** ROC-Kurve der Modellergebnisse des TEST-Datensatzes, AUC = 0,91; Richtige positiv Rate(Sensitivität), Falsch positiv Rate (1-Spezifität) 67

Verzeichnis der Karten im Text

Karte 5.1:	<i>Bekannte SFE-Orte in BW (Zeitraum: 1980 – 2018, Anzahl: 359) und deren zugehörige BEZG</i>	49
-------------------	---	----

Verzeichnis der Tabellen im Text

Tabelle 2.1:	Starkregen Warnstufen des DWD	4
Tabelle 2.2:	Gegenüberstellung der Eigenschaften und Abflussganglinien (Abbildungen) einer SF und eines Flusshochwassers (Borga et al., 2011; Bronstert et al., 2017b; Munich RE, 2017; Patt and Jüpner, 2013)	13
Tabelle 4.1:	Multivariate Analysemethoden: Strukturen-prüfende Verfahren; verwendete Methoden in schwarz (Backhaus et al., 2018)	43
Tabelle 5.1:	Ergebnisse der Ereignisauswahl von der Gegenanalyse mit den jeweiligen Anteilen an den Gesamtanzahlen [%] im Vergleich zu den bekannten SFE	55
Tabelle 5.2:	Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Varianzanalyse zu den Niederschlags- und Gebietsparametern; Signifikanz: $< 2e-16$ (+++); $< 0,001$ (++) ; $< 0,01$ (+); $> 0,05$ (○)	61
Tabelle 5.3:	Modellergebnisse der LR auf Basis des TRAIN-Datensatzes, y-Achsenabschnitt (b_0) = 2,1.	64
Tabelle 5.4:	Konfusionsmatrix der Klassifikationsergebnisse des LR-Modells für den TRAIN-Datensatz bei einem Schwellenwert von 0,35 %, RN = Richtig negativ; FP = Falsch positiv, FN= Falsch negativ, RP= Richtig positiv, N = Real negativ (gesamt), P = Real positiv (gesamt), N*= Vorhergesagt negativ (gesamt), P* = Vorhergesagt positiv (gesamt), Richtig klassifizierte Ereignisse in Blau hinterlegt.	66
Tabelle 5.5:	Konfusionsmatrix der Klassifikationsergebnisse des LR-Modells für den TEST-Datensatz bei einem Schwellenwert von 0,35 %, RN = Richtig negativ; FP = Falsch positiv, FN= Falsch negativ, RP= Richtig positiv, N = Real negativ (gesamt), P = Real positiv (gesamt), N*= Vorhergesagt negativ (gesamt), P* = Vorhergesagt positiv (gesamt), Richtig klassifizierte Ereignisse in Blau hinterlegt.	67

Verzeichnis der Abkürzungen und Symbole im Text

Abkürzung/ Symbole	Bedeutung
ANOVA	Varianzanalyse (Analysis Of VAriance)
BW	Baden-Württemberg
BEZG	Basiseinzugsgebiet (e)
b₀	Y-Achsenabschnitt
b_n	Regressionskoeffizient
DWD	Deutscher Wetterdienst
EO	Sturzflutereignisort(e)
EZG	Einzugsgebiet (e)
F	Forschungsfrage (n)
FFG	Flash Flood Guidance
FN/ FP	Falsch negativ/ Falsch positiv
GE	Gegenanalyseereignis (se)
LAWA	Länder- und Arbeitsgemeinschaft Wasser
LR	Logistische Regression
MO	Maxort (e)
N/ N*	In Wahrheit negativ/ Vorhergesagt negativ
P/ P*	In Wahrheit positiv / Vorhergesagt positiv
NA-Modell	Niederschlag-Abfluss Modell
NSFE	Nicht Sturzflutereignis (se)
OAK	Oberflächenabflusskennwert (e)
p	Eintrittswahrscheinlichkeit
RN / RP	Richtig negativ / Richtig positiv
SF /SFE	Sturzflut (en)/ Sturzflutereignis (se)
SR / SRE	Starkregen / Starkregenereignis(se)
TEST	Datensatz (30 %) für Validierung des Modells
TRAIN	Datensatz (70%) für „Training“ des Modells
UH	Untersuchungshypothese
WaBoA	Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg
Y	Abhängige Variable

Zusammenfassung

Aufgrund ihres hohen Schadens- und Gefahrenpotentials besitzen *Sturzfluten* als Naturgefahr eine hohe Relevanz für Wissenschaft und Gesellschaft. *Starkregen* bildet dabei die Hauptursache für Sturzfluten. Über die im Zuge des Klimawandels prognostizierte Intensivierung des globalen Wasserkreislaufs und der voraussichtlichen Zunahme von Extremwetterereignissen, wird zukünftig auch mit einem verstärkten Auftreten von Sturzfluten gerechnet. Hier ergibt sich somit ein zunehmendes Gefährdungspotential, dem es gilt entgegenzuwirken. Ziel dieser Arbeit ist es daher, die Bedingungen, unter welchen in der Vergangenheit Sturzfluten aufgetreten sind, für *Baden-Württemberg* umfassend zu analysieren und die einflussstärksten Faktoren zur Bildung einer Sturzflut abzugrenzen. Als Analysegrundlage wurde ein aktueller *Ereigniskatalog* zu bekannten Sturzflutereignissen in Baden-Württemberg erstellt. In Kombination mit *Radardaten* wurde dieser für eine umfassende Analyse und Charakterisierung der Sturzflut auslösenden Niederschlagsbedingungen verwendet. Zur Schaffung einer Vergleichsbasis zu den bekannten Sturzflutereignisorten, wurden Ereignisorte in Baden-Württemberg identifiziert, an denen es bei ähnlicher Niederschlagcharakteristik zu keiner bekannten Sturzflut gekommen ist. Für beide Ereignisgruppen (Ort mit/ ohne Sturzflut) wurde anschließend mittels einer *Varianzanalyse* ein Gruppenvergleich auf Basis ausgewählter, zuvor aufbereiteter Niederschlags- und Gebietskennwerte durchgeführt. Kennwerte mit signifikanten Gruppenunterschieden wurden als sturzflutbildungsrelevant eingeordnet. Die individuellen Einflüsse der bildungsrelevanten Parameter auf die Eintrittswahrscheinlichkeit einer Sturzflut, wurden über eine *Logistische Regression* quantifiziert, sodass die einflussstärksten Sturzflutbildungsfaktoren abgegrenzt werden konnten. Grundsätzlich hat sich gezeigt, dass Sturzfluten landesweit in Baden-Württemberg aufgetreten können. Lediglich ein sehr geringer Anteil der jährlichen Starkregenereignisse führt dabei letztendlich zu einer Sturzflut. Für Niederschlagsereignisse mit einer maximalen Niederschlagsstundensumme von kleiner 15 mm, hat sich das Auftreten einer Sturzflut als unwahrscheinlich herausgestellt. Als die einflussstärksten Sturzflutbildungsfaktoren haben sich die Parameter der maximalen mittleren Niederschlagsintensität im Einzugsgebiet, der mittlere Versiegelungsgrad im Einzugsgebiet, die Einzugsgebietsfläche, die Niederschlagsflächenmittelabnahme ausgehend vom Ereignisort und die maximale Niederschlagsstundensumme am Ereignisort erwiesen. In dieser Arbeit wurden erstmals die bekannten Sturzflutereignisse in Baden-Württemberg in ihrer Gesamtheit analysiert und ausgewertet.

Schlagwörter: Sturzflut, Starkregen, Baden-Württemberg, Ereigniskatalog, Radardaten, Varianzanalyse, Logistische Regression

Abstract

Due to their potential to be highly damaging and dangerous, *flash floods* are natural hazards that are of great relevance for science as well as modern society. *Heavy rainfall* is the main cause of flash floods. Flash floods are also expected to occur more frequently in the future, due to the predicted intensification of the global water cycle and the expected increase in extreme weather events as a result of climate change. As a result, the risk potential of flash floods will continue to increase, and this must be counteracted. The aim of this work is, therefore, to comprehensively analyze the conditions under which flash floods have occurred in *Baden-Württemberg* in the past and to identify the most influential factors in flash flood formation. A current *catalogue of known flash flood events* in Baden-Württemberg was compiled as a basis for this study. In combination with *radar data*, this catalogue was used to create a comprehensive analysis and characterization of the precipitation conditions that trigger flash floods. In order to create a basis for comparing different known flash flood event types, several event locations with similar precipitation characteristics in *Baden-Württemberg*, at which no known flash floods had occurred, were identified. A *variance analysis* was used to compare two event groups, the first comprised of locations that had experienced flash floods and the second those that had not, on the basis of selected, previously calculated precipitation and area parameters. Particular values with significant group differences were classified as relevant for flash flood formation. The individual influences of the formation-relevant parameters on the occurrence probability of a flash flood were quantified by use of a *logistic regression*, which allowed for identification of the most influential flash flood formation factors. The results of this study found that, in general, flash floods can occur throughout Baden-Württemberg. In addition, it was proven that only a very small proportion of heavy rain events ultimately lead to flash floods. For precipitation events with an hourly maximum precipitation sum of less than 15 mm, the occurrence of a flash flood has turned out to be unlikely. The parameters of the maximum mean precipitation intensity in the catchment area, the mean sealing degree in the catchment area, the catchment area, the precipitation area mean decrease starting from the event location and the hourly sum of maximum precipitation at the event location, have proven to be the most influential flash flood formation factors. Through this work, the known flash flood events in Baden-Württemberg were analyzed and evaluated in their entirety for the first time.

Keywords: flash flood, heavy rainfall, Baden-Württemberg, catalogue of events, radar data, analysis of variance, logistic regression

1. Einleitung

Keine andere Naturgefahr tritt weltweit so häufig auf wie Überschwemmungen. Nur wenige Regionen der Erde sind nicht betroffen. An manchen Stellen treten Überschwemmungen fast regelmäßig auf, an anderen nur sehr selten – dann aber umso unerwarteter. Sie sind nicht auf die Gebiete entlang von Flüssen beschränkt, sondern können auch fern ab davon auftreten. Weltweit verursachen unterschiedliche Formen von Überschwemmungen jährlich enorme Schäden (Berz et al., 2001). Diese können wirtschaftlicher oder ökologischer Natur sein, Kulturgüter betreffen oder sich durch eine Vielzahl an Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit äußern. Nicht selten führen sie auch zum Verlust von Menschenleben (Jonkman, 2005). Mit 47% der weltweit relevanten Naturkatastrophen verursachten allein Flusshochwässer und Sturzfluten 2017 einen versicherten, globalen Gesamtschaden von ca. 27 Mrd. US\$ und forderten weltweit die meisten Todesopfer (Munich RE, 2018). Die Schäden einzelner Sturzfluten sind dabei meist geringer als bei großen Flusshochwässern. Aufgrund des häufigeren Auftretens von Sturzfluten sind die mittleren, jährlichen Schadenssummen jedoch vergleichbar (GDV, 2015; Munich RE, 2005; Patt and Jüpner, 2013). Sturzfluten gelten als die tödlichsten Überschwemmungsereignisse (Borga et al., 2014; Jonkman, 2005).

Sturzfluten, engl.: “flash floods“, stellen als hydrologische Extremereignisse kein grundlegend neues wissenschaftliches Phänomen dar, jedoch besitzen sie aufgrund ihres großen Naturgefahrenpotentials eine hohe Relevanz für Wissenschaft und Gesellschaft (Borga et al., 2011). Im Kontext des Klimawandels und der prognostizierten Intensivierung des globalen Wasserkreislaufs wird zudem angenommen, dass die Anzahl sowie die Intensität an Extremwetterereignissen zukünftig zunehmen werden (Huntington, 2006; IPCC, 2015). Als Folge wird auch mit einem verstärkten Auftreten von Starkregen und Sturzfluten gerechnet (Buchholz et al., 2017; Hapuarachchi et al., 2011; IPCC, 2015). Gleichzeitig führt das globale Bevölkerungswachstum, der stetig steigende Druck auf die Flächennutzung durch ökonomische und soziale Entwicklung, die fortschreitende Urbanisierung in hochwassergefährdeten Gebieten und die begrenzte Entwicklung nachhaltiger Schutzstrategien zu einer potenziell wachsenden Gefährdung durch Überschwemmungsereignisse (Borga et al., 2011; Jonkman, 2005). Auch das geringe Risikobewusstsein der Kommunen und Bevölkerung gegenüber den Auswirkungen von Starkregen bildet einen weiteren Gefährdungsaspekt (Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, 2015).

Der Starkregen an sich stellt dabei grundlegend nicht das direkte Problem dar, dennoch sind rund die Hälfte der Überschwemmungsschäden in Deutschland auf Starkregen zurückzuführen (Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, 2015). Das eigentliche Problem manifestiert sich erst ab einer gewissen Schwelle bei Kombination von Niederschlagsintensität/-dauer des Ereignisses mit den lokalen Gegebenheiten. Folge ist dann das direkte, schadenbringende Problem einer Überschwemmung wie bspw. bei einer Sturzflut (Borga et al., 2014; Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, 2015). Eine Sturzflut kann nahezu überall, auch fernab von Gewässern auftreten (Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, 2015). Das grundlegende Problem: Zu viel Wasser in zu kurzer Zeit (Doswell, 2001). Nicht jeder Starkregen muss dabei zwangsläufig zu einer Überschwemmung oder Sturzflut führen, je nach Verlauf des Ereignisses kann er auch folgenlos bleiben. Dies ist jedoch selten der Fall (Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, 2015)

In Deutschland haben die Sturzfluten von Braunsbach (Baden-Württemberg) und Simbach (Bayern) im Frühsommer 2016 gezeigt, welch verheerendes Ausmaß eine Sturzflut erreichen kann und welch weitreichende Folgen und Problemaspekte sie mit sich bringt (Bronstert et al., 2017a).

Starkregen bildet dabei die Hauptursache zur Entstehung von Sturzfluten (Gaume et al., 2009). Der Ereignisverlauf von Sturzfluten ist dementsprechend eng an Starkregenereignisse gebunden. Starkregen sind aufgrund ihrer Eigenschaften schwer präzise vorherzusagen, was folglich auch für die daraus resultierenden Sturzfluten gilt (Borga et al., 2014). Hinzukommt, dass je nach Gebietscharakteristika eine Sturzflut ausgelöst werden kann oder diese ausbleibt. Wenn es zur Sturzflut kommt, besitzt dieses Ereignis typischer Weise nur eine sehr kurze Reaktionszeit und eine dementsprechend von Natur aus sehr geringe Vorwarnzeit (Borga et al., 2014).

Sturzfluten treten zudem häufig in kleinen, steilen Einzugsgebieten (EZG) auf, in denen die Abflusskonzentration beschleunigt abläuft bzw. das Abflussgeschehen schnell auf das Niederschlagsereignis reagiert. Für diese Gebiete stehen meist nur unzureichend Messdaten von Niederschlagsstationen oder Pegeln zur Verfügung. Das Fehlen langjähriger Messreihen zu diesen Ereignissen (Sturzflut ausgelöst von Starkniederschlag) führt dabei unter anderem dazu, dass extremwertstatistische Analysen nicht durchgeführt und Niederschlags-Abflussmodelle (NA-Modelle) für diese Ereignisse nicht kalibriert werden können (Steinbrich et al., 2015). Dies sorgt für zusätzliche Herausforderungen bei der hydrologischen Modellierung und erschwert eine präzise Vorhersage dieser Ereignisse (Hapuarachchi et al., 2011).

Ein verbessertes Verständnis von Sturzfluten und den auslösenden Starkniederschlagsereignissen ist somit in vielerlei Hinsicht von Bedeutung (Borga et al., 2014; Gourley et al., 2014). Ein gutes Prozess- und Systemverständnis von Sturzfluten bildet die Grundlage für ein effektives Risikomanagement (Borga et al., 2010). Dahingehend soll in dieser Arbeit versucht werden, das Verständnis zu den relevanten Sturzflutbildungsfaktoren weiter zu verbessern und deren individuelle Einflüsse auf den Ereignisverlauf zu analysieren. Ein verbessertes Verständnis der Teilaspekte soll zu einer verbesserten, zukünftigen Vorhersagbarkeit beitragen und gegen das potenziell zunehmende Gefahrenpotential, welches von Starkregen und Sturzfluten ausgeht, wirken.

2. Stand des Wissens

2.1 Starkregen

2.1.1 Definition und Charakteristika

Als Starkregen (SR) allgemein bezeichnet man Niederschläge, welche im Verhältnis zu ihrer Dauer eine hohe Intensität aufweisen, meist eine sehr geringe räumliche Ausdehnung haben und vergleichsweise selten auftreten (Brasseur et al., 2017; Gaume et al., 2009). Hier existieren unterschiedliche Definitionen zur Einordnung. Die Einordnung kann bspw. über die Überschreitung einer bestimmten Niederschlagshöhe (Schwellenwert), einer bestimmten Wahrscheinlichkeit (Wiederkehrperiode) oder anderer statistischer Vergleichswerte erfolgen. Je nach Literatur werden meist etwas unterschiedliche Definitionen verwendet (Brasseur et al., 2017).

Der Deutsche Wetterdienst (DWD) definiert SR ab einer stündlichen Niederschlagssumme von 15 mm oder einer sechsstündigen Niederschlagssumme von 20 mm. Darüber hinaus werden drei verschiedene Intensitätsstufen differenziert (Tab. 2.1), welche gleichzeitig als Warnstufen für Deutschland verwendet werden (DWD, o.D.b). Der historische Spitzenwert für SR in Deutschland liegt bei 312 mm pro Tag im Jahr 2002 in Zinnwald-Georgenfeld (DWD, o.D.b).

Tabelle 2.1: Starkregen Warnstufen des DWD

	mm/ 1 h	mm/ 6 h
Starkregen	15 - 25	20 - 35
Heftiger Starkregen	25 - 40	35 - 60
Extrem heftiger Starkregen	> 40	> 60

SR treten in Deutschland vor allem in den Sommermonaten auf. Dies ist der Fall, da die Lufttemperatur im Sommer höher ist und die Luft dadurch mehr Wasser aufnimmt (Clausius-Clapeyron-Beziehung) bzw. später im Zuge eines Niederschlagsereignisses wieder freigeben kann (DWD, 2016). Meist sind SR konvektive Niederschlagsereignisse. Diese entstehen, wenn sich bodennahe Luftmassen erwärmen, aufsteigen und es zu einer starken vertikalen Zirkulationsströmung (= Konvektion) kommt. Mit zunehmender Höhe kühlen sich die warmfeuchten Luftmassen ab und kondensieren zu mächtigen Wolken (bspw. Cumulonimbus), die sich zu gegebener Zeit dann entladen (DWD, 2016, o.D.c). Konvektionsniederschläge treten häufig auch in Verbindung mit Gewittern auf und werden mit kurz andauernden, lokalen und hoch intensiven Niederschlägen mit teilweise schnell wechselnden Niederschlagsintensitäten assoziiert (Abb. 2.1) (Brasseur et al., 2017; DWD, 2016).

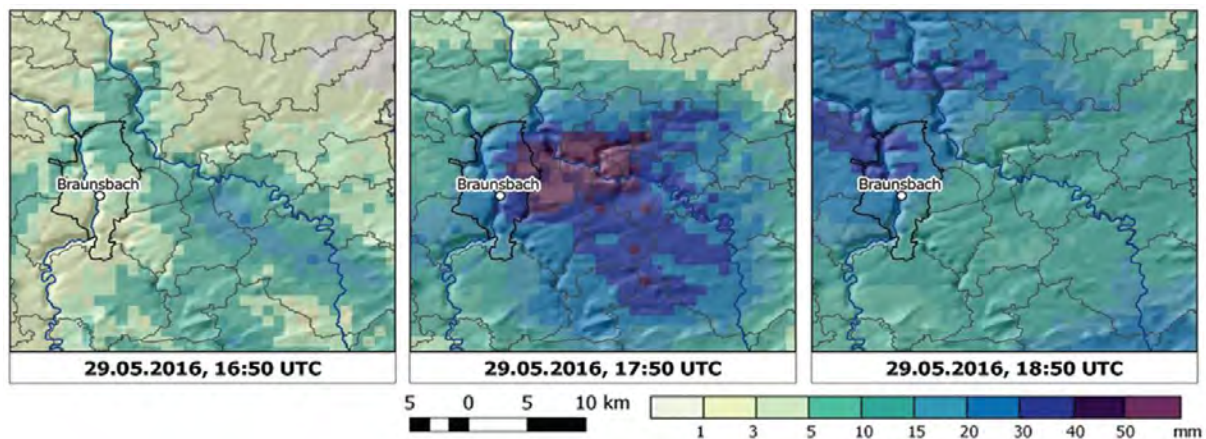


Abbildung 2.1: Entwicklung des konvektiven Niederschlagsereignisses über Braunsbach (Baden-Württemberg) am 29. Mai 2016 in den drei intensivsten Stunden; Datengrundlage: Stündliche Radarniederschläge (RADOLAN) (Ziese et al., 2016).

Auch orographischer Niederschlag ist eine Form des Konvektionsniederschlags, jedoch ist hier die Konvektion erzwungen und der vertikale Transport wird durch eine äußere Einwirkung (bspw. Gebirge) hervorgerufen (Brasseur et al., 2017). Neben den physikalischen Gesetzmäßigkeiten spielen auch die atmosphärischen Bedingungen, wie bspw. die vorherrschende Großwetterlage, für die Entstehung von Starkregenereignissen (SRE) eine einflussnehmende Rolle (LUBW, 2016). In Deutschland führte bspw. die Großwetterlage „Tief Mitteleuropa“ im Frühjahr 2016 zu folgeschweren Gewittern mit Starkniederschlägen (Bronstert et al., 2017a; Munich RE, 2018). Obgleich die Großwetterlage Tief Mitteleuropa in Deutschland bereits ein erhebliches Unwetterpotential demonstriert hat, ist diese dennoch nicht zwangsläufig typisch für starke, konvektive Niederschläge (Ziese et al., 2016). Viel mehr charakteristisch sind die konvektionsauslösenden Bedingungen und eine gewisse Persistenz der Wetterlage. Die Persistenz führt dabei zu geringen mittleren Windgeschwindigkeiten und einer nur langsamen Fortbewegung der Gewitterzellen, was den Auslöser für extreme Niederschlagsereignisse und lokale Spitzenwerte bilden kann (Bronstert et al., 2017a).

2.1.2 Erfassung und Einordnung

Die genaue Erfassung des Regengeschehens ist für die Hydrologie und wasserwirtschaftliche Aufgaben von zentraler Bedeutung. SRE mit den herkömmlichen, terrestrischen Niederschlagsstationsmessungen zu erfassen ist dabei, trotz des gut ausgebauten Bodenmessnetzes in Deutschland problematisch (Pfister et al., 2015). Das Problem, sind die sich bei heftigem SR häufig sehr lokal bildenden, kleinräumigen Niederschlagszellen. Diese können über die Punktmessungen der Regenschreiber nur schwer erfasst und verortet werden (Fohrer et al., 2016; Pfister et al., 2015; Treis et al., 2017). In den letzten Jahrzehnten haben sich daher immer

weiter Radarsysteme zur Beobachtung des Niederschlagsgeschehens mit besonderem Blick auf Extremereignisse etabliert, da diese es ermöglichen, das Regengeschehen weiträumig, flächenhaft und in hoher zeitlicher Auflösung zu erfassen (Brasseur et al., 2017; Treis et al., 2017; Winterrath et al., 2017). Bei der zeitlichen und räumlichen Analyse von SRE werden somit mittlerweile überwiegend radarbasierte Daten zur Auswertung, Nachbereitung und Vorhersage der Ereignisse genutzt (Brasseur et al., 2017; Pfister et al., 2015; Winterrath et al., 2017). Nichtsdestotrotz bilden die bodengebundenen Punktmessungen des Niederschlags, aufgrund der langjährigen Zeitreihen, weiterhin eine wichtige Grundlage für wasserwirtschaftliche Analysen und Planungen (Pfister et al., 2015).

Für die statistische Einordnung von vergangenen und aktuellen SRE in Deutschland, kann das DWD Produkt KOSTRA (Koordinierte Starkniederschlagsregionalisierung und -auswertung) verwendet werden (DWD, 2018b). Dieses beinhaltet einen Rasterdatensatz mit statistischen Niederschlagswerten in Abhängigkeit der Dauerstufen und Wiederkehrintervalle. Mithilfe dieser Daten ist es möglich, die Niederschlagshöhe starker Regenereignisse bezüglich ihrer Jährlichkeit einzuordnen und so bspw. das mögliche Schadenspotential einzuschätzen (DWD, 2018b). In Ergänzung zur statistischen Auswertung können extreme SR der Vergangenheit zudem gemäß eines Starkregenindexes eingeordnet werden (Treis et al., 2017). Hier existieren unterschiedliche Berechnungsverfahren (Mudersbach et al., 2017). Die Indexbewertung ist analog zu herkömmlichen, dimensionslosen Index-Bewertungsskalen für Naturgefahren (bspw. Beaufortskala, Richterskala) und soll eine vereinfachte Einordnung hinsichtlich der Schwere des SRE ermöglichen. Je größer der Starkregenindex ist, als desto extremer bzw. seltener ist der SR einzuordnen. Diese Einordnung der Ereignisse über Kennzahlen soll dabei die herkömmliche Einordnung von Niederschlagsereignissen über die Parameter Dauer, Wiederkehrzeit und Regenhöhe ersetzen und eine vereinfachte Risikokommunikation und Stärkung des öffentlichen Risikobewusstseins hinsichtlich extremer SRE herbeiführen (Treis et al., 2017).

2.1.3 Trends im Auftreten

Bei der Untersuchung von langfristigen SR-Trends in Deutschland ermöglichen umfassende Niederschlagszeitreihen die Unterscheidung von kurz-/mittelfristigen Variationen und langfristigen Trends. Zu unterscheiden sind dabei Trends in der Häufigkeit des Auftretens und Trends in der Intensität der Ereignisse (DWD, 2016).

Betrachtet man zunächst grundlegend die Gesamtanzahl der Niederschlagssummen über Deutschland im Zeitraum von 2001-2016, in denen die Starkregenwarnstufen des DWD überschritten wurden, ergibt sich folgendes Bild (Abb. 2.2). Bei geringen Schwellenwerten (Warnstufe 2 - markantes Wetter) ist eine bevorzugte Bindung der Ereignisse an die Höhenlagen bzw. Topographie Deutschlands erkennbar. Für die anderen Warnstufen (Stufe 3/4 – Unwetter/ extremes Unwetter) zeigt sich eine Ablösung der Maxima von den topographischen Strukturen. Extremereignisse kurzer Dauerstufen sind im Betrachtungszeitraum nahezu in allen Regionen Deutschlands aufgetreten (Winterrath et al., 2017).

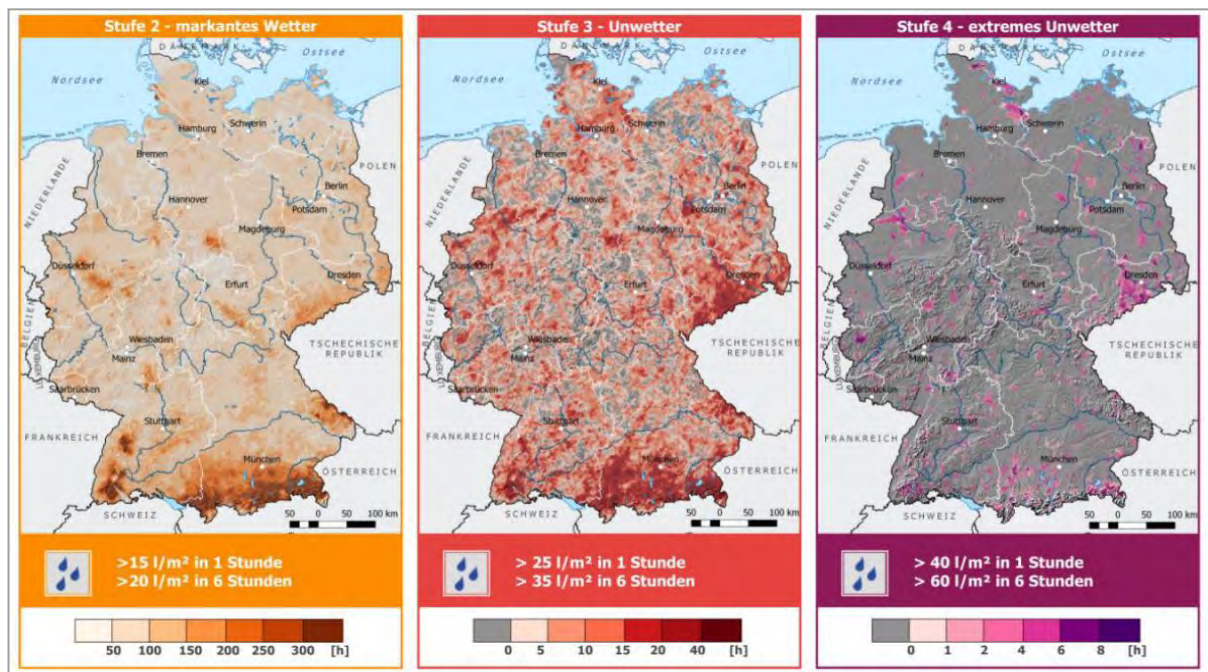


Abbildung 2.2: Gesamtanzahl der Niederschlagsstunden, in denen die Warnschwellen des DWD für SR im Zeitraum 2001 bis 2016 überschritten wurden (Winterrath et al., 2017).

Bei der Analyse der täglichen Winterniederschläge hat sich für alle Regionen in Deutschland im Zeitraum 1951-2006 eine Zunahme der Tage mit hohen Niederschlagsmengen (Ereignis, das im Referenzzeitraum einmal alle 100 Tage auftritt) von ca. 25% gezeigt. Im Frühjahr und Herbst zeigt sich ebenfalls ein leicht ansteigender Trend (DWD, 2016). Für die extremen Sommerniederschläge in Deutschland konnte bisher kein Trend nachgewiesen werden. Hier zeigt sich lediglich eine kurz- bis mittelfristig dominierende zyklische Variabilität. Grundsätzlich zeigen sich bei extremen Niederschlagsereignissen im Winter deutlich kleinere Niederschlagsmengen als im Sommer.

Mithilfe von Radardaten durchgeführte Analysen der Niederschläge mit Andauern $< 24 \text{ h}$ weisen in verschiedenen Regionen Deutschlands auf eine Zunahme von Starkniederschlägen kur-

zer Dauern hin. Diese Ergebnisse basieren jedoch auf Zeitreihen von lediglich 15 Jahren, welche aus klimatologischer Sicht nicht aussagekräftig sind und durch kurz- oder mittelfristige Variationen bedingt sein können (DWD, 2016).

Anhand einer regionalen Studie von Mueller und Pfister (2011) konnte für verschiedene Standorte im Emscher-Lippe-Gebiet in Nordrhein-Westfalen nachgewiesen werden, dass die Anzahl von kurz andauernden Niederschlagsereignissen mit hohen Intensitäten in den letzten Jahrzehnten (besonders ausgeprägt in den letzten 35 Jahren der Studie) zugenommen hat. Als sehr deutlich hat sich die Trendzunahme in den Sommermonaten Juli bis September herausgestellt (Mueller and Pfister, 2011). Die Studie gründet dabei auf einer sehr fundierten Datengrundlage mit langen Niederschlagszeitreihen (70 Jahre; 1939-2009) in einer außergewöhnlich hohen zeitlichen Auflösung (1min). Die festgestellte Zunahme von bis zu 0,5 Ereignissen pro Jahr deutet dementsprechend auf eine deutliche Zunahme der Häufigkeit solcher Regenereignisse, mit Intensitäten von $> 0,3$ mm/min, im Untersuchungsgebiet hin (Mueller and Pfister, 2011). Darüber hinaus betrachten die Autoren die Wirkung dieser Änderung im Hinblick auf erosionsauslösende Regenfälle. Hierbei hat sich ein kritischer Wertebereich für Erosionsereignisse mit den kombinierten Eigenschaften Niederschlagsintensitäten von $0,3 - 0,7$ mm/min, Niederschlagsdauern von $2 - 10$ min und Niederschlagsmengen von $1 - 3$ mm herauscharakterisiert (Brasseur et al., 2017; Mueller and Pfister, 2011). Eine weitere Studie von Fiener et al. (2013), welche mit derselben Datengrundlage für das gleiche Untersuchungsgebiet arbeitet, bestätigt, dass der erosionsrelevante SR seit Mitte der 1970er-Jahre signifikant zunimmt. Die Studie geht dabei von einer Zunahme von 21% pro Jahrzehnt aus (Fiener et al., 2013). Ob die Aussagen auch für die Großregion Deutschland/ Zentraleuropa zutreffen, soll in kommenden Analyseschritten geklärt werden. Hier stellt die Datenverfügbarkeit noch ein limitierendes Problem dar (Brasseur et al., 2017; Bronstert et al., 2017b; Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW, 2010).

Die angesprochenen Trends weisen auf eine merkliche Einflussnahme des Klimawandels auf das vergangene und aktuelle Niederschlagsgeschehen in Deutschland hin. Neben dem allgemein positiven Starkregentrend für die Landmassen der mittleren Breiten, ist auch für Baden-Württemberg (BW) im Speziellen eine Häufigkeits- und Intensitätszunahme prognostiziert (IPCC, 2015; LUBW, 2013).

Diese Annahmen basieren auf den Auswertungen verschiedener regionaler Klimaprojektionen für BW (Ensamble-Ansatz), denen unterschiedliche Emissionsszenarien zugrunde liegen. Die

Klimaprojektionen wurden für den Ist-Zustand (1971-2000), die nahe Zukunft (2021-2050) und die ferne Zukunft (2071-2100) ausgewertet, um die Folgen des Klimawandels in BW abschätzen zu können (LUBW, 2013). Dabei wurden die SR relevanten Kennwerte, Anzahl der Tage mit Starkniederschlag (Tagessumme > 25 mm) und Starkniederschlagshöhe (max. Niederschlagssumme pro Tag innerhalb eines Kalenderjahres), abgeleitet und ausgewertet. In der Prognose für die nahe und ferne Zukunft, nimmt der Median der Starkniederschlagshöhe um 6,5 % bzw. 12,8 % zu. Auch für die Anzahl der Starkniederschlagstage pro Jahr (Flächenmittel für BW) gehen die Prognosen in der nahen, wie fernen Zukunft von einer Zunahme des Medians aus (Ist-Zustand: 3,6, nahe Zukunft: 4,2, ferne Zukunft 4,7). Je nach Klimaprojektion ergeben sich dabei leicht unterschiedliche Prognosen, die anhand der Entwicklung des Medians einen Trend aufzeigen. Laut Auswertung der Klimaprojektionen nehmen die Intensität sowie die Häufigkeit von SRE in BW zukünftig zu (LUBW, 2013). Die möglichen quantitativen und qualitativen Veränderungen des Niederschlags weisen dabei ein hohes Maß an Unsicherheit auf, welches versucht wird durch die Ensemble Betrachtung einzuschränken (LUBW, 2013).

2.1.4 Vorhersage und Management

Vor dem Hintergrund des Klimawandels ist eine Zunahme von SRE und damit eine Verschärfung der daraus resultierenden Risiken wahrscheinlich. Neben der Langzeitentwicklung spielt daher speziell die kurzzeitige Vorhersage von lokalen SRE im Hinblick auf die direkte und akute Gefährdung die von diesen ausgeht, eine zentrale Rolle. SR kann grundsätzlich jeden Ort treffen und entsprechende Schäden verursachen. Eine scharfe Abgrenzung räumlicher Betroffenheiten ist aufgrund zu wenig gesicherter Grundlagendaten aktuell noch nicht möglich (LAWA, 2018). Die exakte Vorhersage dieser Ereignisse ist wegen der Spontanität und Intensität der Starkniederschlagsereignisse in Kombination mit der Unsicherheit des Gefährdungsortes (kleinräumiges, lokales Auftreten) besonders schwierig (LAWA, 2018; LUBW, 2016). Dies ist trotz der verbesserten Vorhersagequalität in den letzten Jahren, durch bspw. die Anwendung von Nowcasting-Produkten (Niederschlagsradar/ Satellitenbilder; Vorhersagen von bis zu 2 h), der Fall (LAWA, 2018). Bis 2020/2021 plant der DWD daher ein „Integriertes Vorhersagesystem“ zu entwickeln, welches eine Vorhersagezeit von bis zu 12 h ermöglicht. Hierfür sollen bisher getrennte Vorhersagesysteme des Nowcastings und der numerischen Wettervorhersage kombiniert und weiterentwickelt werden, sodass sie zu einer verbesserten und bruchfreien Vorhersage führen (DWD, o.D.a; LAWA, 2018).

Um zukünftig deutschlandweit geeignete Vorhersage- oder Frühwarnsysteme sowie die Starkregenvorsorge weiter voranzubringen, hat 2016 die Umweltministerkonferenz die Bund und Länder Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) beauftragt, eine Strategie zum effektiven SR-Risikomanagement in Anlehnung an die Hochwassermanagement-Richtlinie zu entwickeln. Diese enthält Grundlagen und Handlungsempfehlungen zur Verbesserung der Vorhersage- bzw. Frühwarnsysteme, Verbesserung der Risikobewertung und -kommunikation, Verbesserung der Aufklärung der Bevölkerung und Verhaltensweisen im Krisenfall, Verbesserung der vorsorgenden Raum- und Flächennutzung und Stadtplanung in Deutschland. Die Empfehlungen richten sich dabei an verschiedene Akteure wie die Politik, Verwaltungen auf Landesebene, Kommunen und Planende, Land- und Forstwirtschaft sowie an Privatpersonen und Unternehmen (DKKV, 2017; LAWA, 2018). In BW wurde bereits 2016 ein SR Leitfaden herausgegeben, welcher das Ziel verfolgt, den verantwortlichen Entscheidungsträgern der Kommunalverwaltung ein landesweit einheitliches Verfahren zur Verfügung zu stellen. Der Leitfaden beinhaltet dabei Informationen und Anleitungen zur Durchführung einer Gefährdungs- und Risikoanalyse in Bezug auf SR und bildet damit die Grundlage für eine effektive Schadensreduzierung (LUBW, 2016). Geeignete Vorsorgemaßnahmen ermöglichen es dabei, das Schadenspotential bzw. Gefährdungsrisiko (Vulnerabilität) deutlich zu verringern (LUBW, 2016; Fohrer et al., 2016). Neben den technischen Schutzmaßnahmen werden verstärkt alternative Maßnahmenfelder des Risikomanagements (bspw. Natürlicher Wasserrückhalt, Flächen- und Bauvorsorge, Krisenmanagement, technische Schutzeinrichtungen, Eigenvorsorge, Informationsvorsorge und Risikovorsorge) zur Minderung der bestehenden Risiken angegangen. Ein effektives und integratives SR-Risikomanagement soll letztendlich durch eine Kombination aus baulichen Maßnahmen, welche das Wasser ableiten bzw. zurückhalten und durch Vorsorgemaßnahmen die das allgemeine Schadenspotential im Vorhinein verringern, erreicht werden (LUBW, 2016).

2.1.5 Folgen des SR

Der starke Handlungsbedarf ergibt sich aus den weitreichenden Folgen, welche SRE meist mit sich bringen. Aufgrund der zeitlich und räumlich hoch variablen Niederschlagsverteilung kann Starkregen potenziell alle Regionen treffen und entsprechende Schäden verursachen. Bedingt durch die hohen Niederschlagsintensitäten fließen große Anteile des Niederschlags meist oberflächlich, unkontrolliert ab: Wege, Straßen und Einschnitte im Gelände dienen dabei meist als Abflusswege. Als Folge ergeben sich Überschwemmungen (LAWA, 2018; LUBW, 2016).

Besonders in Gebieten mit starkem Gefälle (Hügelland, Mittelgebirge, Hochgebirge) findet der Großteil der Abflussprozesse außerhalb der Gewässer auf der Geländeoberfläche, als sogenannte Sturzfluten, statt (vgl. Kapitel 2.2) (LUBW, 2016). Die hier auftretenden hohen Strömungsgeschwindigkeiten führen verstärkt zu Bodenerosion und Massenbewegungen. Speziell auf landwirtschaftlichen Flächen geht damit meist eine dauerhafte Minderung der Ertragsfähigkeit bis hin zu lokalen Totalausfällen der Ernte einher (LAWA, 2018). Bei schneller Konzentration der Niederschlagsmengen, kann es lokal auch zur Überlastung/ Stabilitätsgefährdung von Dämmen oder anderen Hochwasserschutzvorrichtungen kommen (Brasseur et al., 2017).

In der Ebene sammelt sich das Niederschlagswasser zunächst in natürlichen (z.B. Senken, Mulden) oder künstlichen Geländetiefpunkten (z.B. Unterführungen, Tiefgaragen). Im flachen Gelände können schnell weite Flächen überschwemmt werden (LAWA, 2018). Besonders stark betroffen von solchen starkregenbedingten Überschwemmungen sind die dicht besiedelten und stark versiegelten Bereiche, die urbanen Räume. Durch den hohen Versiegelungsgrad dieser Räume ist die natürliche Infiltrationskapazität der Flächen deutlich herabgesetzt und weniger Wasser kann infiltrieren. Dies führt zu hohen Abflussraten. Die Entwässerungssysteme haben dabei häufig nicht die Kapazität die Niederschlagsabflüsse aufzunehmen oder werden durch mitgeführtes Material blockiert (Verklausungen), sodass es zu weiteren Überschwemmungen kommt. Typische Konsequenzen im bebauten Umfeld sind Schäden durch Wassereintritt in Gebäude oder Schäden an der Bausubstanz und Tragstruktur von Gebäuden oder Infrastruktureinrichtungen. Des Weiteren können sich erhebliche Folgeschäden durch eine chemische oder mikrobiologische Belastung des Wassers aufgrund von bspw. Mineralölen, Chemikalien oder Fäkalien ergeben (LAWA, 2018). Starkregen hat somit vielfältige, weitreichende und häufig negative Folgen für die Betroffenen und kann auch mit schwerwiegenden Auswirkungen auf die Umwelt einhergehen.

2.2 Sturzflut

2.1.1 Definition und Charakteristika

Sturzfluten (SF) bilden Hochwasserereignisse, die sich aufgrund ihrer Entstehungs- und Wirkungsmechanismen bzw. des hydrologischen Systemverhaltens von anderen Hochwassertypen wie Flusshochwässern oder Sturmfluten unterscheiden (Berz et al., 2001; Bronstert et al., 2017b; Patt and Jüpner, 2013). Eine SF bezeichnet dabei ein lokales, plötzlich eintretendes, extremes und kurzweiliges Überschwemmungsereignis, welches typischerweise durch kurze, lokale und hoch intensive, konvektive Niederschlagsereignisse (SR, vgl. Kap. 2.1.1) ausgelöst wird (Abb. 2.3) (Brasseur et al., 2017; Fohrer et al., 2016; Raynaud et al., 2015). Des Weiteren können aber auch Ereignisse wie Dammbrüche oder Gletscherseeausbrüche aufgrund der plötzlichen Freisetzung von großen Wassermengen zu SF führen (Borga et al., 2014; Hapuarachchi et al., 2011). Im Folgenden werden lediglich die durch SR induzierten Sturzflutereignisse (SFE) weitergehend betrachtet.

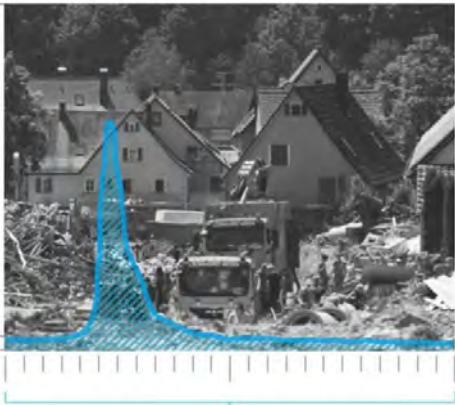
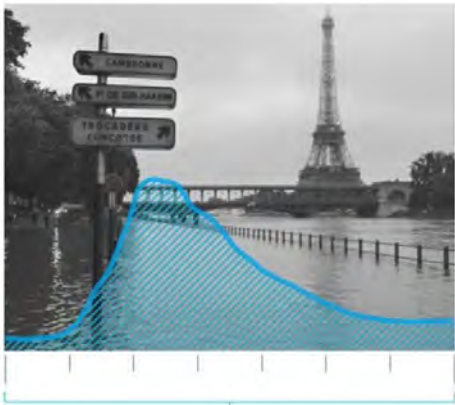


Abbildung 2.3: Sturzflutereignis in Simbach (Bayern) am 01.06.2016 (Rutschmann, 2017)

Im Gegensatz zu Flusshochwässern ist das Ausuferungs- und Überflutungsverhalten von SF sehr singulär bzw. „chaotisch“ und kann sich unabhängig von Gewässern, nahezu überall auf der Geländeoberfläche, abspielen (Borga et al., 2014; Bronstert et al., 2017b). Zudem ist die Reaktionszeit von SF, somit die Zeit zwischen dem auslösendem SRE und dem Hochwasserscheitel, mit meist < 6 h deutlich kürzer als bei Flusshochwässern (Borga et al., 2011; Bronstert

et al., 2017b). Der Maximalabfluss einer SF wird somit meist sehr schnell erreicht und kann um einen zehn- bis hundertfaches höher liegen als bei Normalabfluss (Munich RE, 2017; Bronstert et al., 2017b). Im Vergleich zu Flusshochwässern, bei denen der Abfluss über einen verhältnismäßig langen Zeitraum ansteigt und nur selten mehr als das Zehnfache des Normalabflusses erreicht, agieren SF auf einer deutlich kürzeren Zeitskala. SF weisen dabei grundlegend geringere absolute Abflusswerte auf, der Abflusspeak ist jedoch deutlich ausgeprägter bzw. steiler als bei Flusshochwässern (vgl. Tab. 2.2). Flächenmäßig agieren SF zudem auf einer deutlich kleinräumigeren Skala als Flusshochwässer (Munich RE, 2017).

Tabelle 2.2: Gegenüberstellung der Eigenschaften und Abflussganglinien (Abbildungen) einer SF und eines Flusshochwassers (Borga et al., 2011; Bronstert et al., 2017b; Munich RE, 2017; Patt and Jüpner, 2013)

HW-Art	Sturzflut	Flusshochwasser
	m³/s 50  1 0 1 Tag	2000  200 0 1 Woche
Auslöser	Starkregen	Langandauernder, ergiebiger Niederschlag
Gewässerart	Bäche/ kleine Flüsse, ungebunden	Flüsse, gewässernahe Bereiche
EZG Größe	Klein (< 500 km²), lokal/regional	Groß (Flussgebietseinheiten), überregional
Dauer	Wenige Stunden	Tage bis Wochen
Vorhersage	Schlecht, Minuten bis Stunden	Gut, Stunden bis Tage
Schäden	Meist relativ gering, hohe Frequenz	Hoch, geringe Frequenz

SF treten meist lokal, bevorzugt in kleinen (< 500 km²), steilen oder urban geprägten EZG auf (Bronstert et al., 2017b; Gourley et al., 2014; Marchi et al., 2010). Die geringe Gebietsgröße, das ausgeprägte Relief und die verminderte Oberflächenrauigkeit führen an diesen Orten zu einer schnellen Abflusskonzentration und zu einer schnellen Überflutungsreaktion (Bronstert et al., 2017a; Gaume et al., 2009; Hapuarachchi et al., 2011). Das Relief bedingt zudem orographische Effekte an der Luvseite, welche eine Niederschlagsbildung begünstigen (Abb. 2.2)

(Borga et al., 2011; Winterrath et al., 2017). SFE besitzen ein hohes Schadens- und Gefährdungspotential, welches sich besonders durch die folgenden Merkmale charakterisiert:

- geringe Vorwarnzeit/ Vorhersagefähigkeit: Infolge der kurzen Reaktionszeit ist auch die Vorwarnzeit von SF generell sehr kurz (< 6 h) (Borga et al., 2011; Terti et al., 2015). Die Vorhersage von SFE wird dabei maßgeblich durch die Qualität der Vorhersage (Genauigkeit und Vorlaufzeit) des auslösenden SRE bestimmt (Borga et al., 2011; Bronstert et al., 2017a; Hapuarachchi et al., 2011; Raynaud et al., 2015). Wie bereits im Kapitel 2.1.4 angesprochen, ist die exakte Vorhersage dieser Ereignisse aufgrund ihrer Spontanität und Lokalität nur schwer möglich, was somit auch für die resultierenden SFE gilt. Die Handlungsoptionen zur Einleitung von Gegenmaßnahmen zur Schadensreduzierung sind dementsprechend sehr begrenzt. Die Ereignisse treffen die Betroffenen daher meist unvorbereitet, sind folgeschwer und verursachen hohe Schäden (Kron, 2005).
- meist hohe Fließgeschwindigkeiten: In Gebieten mit ausgeprägtem Gefälle und hoher Reliefenergie fließen bei extremen Niederschlagsereignissen große Abflussanteile als Oberflächenabfluss ab. Dieser kann hohe Fließgeschwindigkeiten erreichen (Bronstert et al., 2017a). Die großen oberflächigen Abflussmengen und hohen Fließgeschwindigkeiten führen zu hohen Bodenerosionsraten und deutlich erhöhten Feststoffanteilen im Abfluss durch mobilisiertes und mitgeführtes Material (bspw. Sediment, Geschiebe, Schwemmholz, Treibgut) (Bronstert et al., 2017a; Vogel et al., 2017). Durch einen erhöhten Feststofftransport nimmt das Schadenspotential einer SF erheblich zu (Bronstert et al., 2017a).
- singuläres bzw. spontanes Verhalten: Das Ausuferungs- und Überflutungsverhalten von SF ist schwer vorhersagbar und wird häufig durch singuläre, lokale Gegebenheiten maßgeblich beeinflusst (Bronstert et al., 2017b). So können bspw. plötzliche Verlagerungen im Flusslauf, Ablagerungen und Verschlüsse durch Geröll und Schwemmholz in natürlichen oder baulichen Engstellen (bspw. Brücken, Durchläufe), je nach Menge und Beschaffenheit des mitgeführten Materials, zu einem spontanen Rückstau und einer Änderung des Fließweges führen. Typisch sind dabei fast spontane Verschlüsse der Fließgewässer (Verklausungen) durch Treibgut oder Geröll. Lösen sich diese Hindernisse im Verlauf des Ereignisses, ist auch eine schlagartige Erhöhung der Abflussspitze möglich (Bronstert et al., 2017a).

Auch im Flachland kann SR zu SF in Form von ausgedehnten Überschwemmungen führen. Die mangelnde Geländeneigung führt hier allerdings zu keinen bis geringen Fließgeschwindigkeiten, sodass das Niederschlagswasser nicht schnell genug abgeführt werden kann. Da die

Infiltrationskapazität der Böden meist schnell erschöpft ist, bilden sich ausgedehnte Überschwemmungen (Patt and Jüpner, 2013). SF im Flachland haben dabei meist weniger verheerende Auswirkungen als SF im Hügelland, Mittelgebirge oder Hochgebirge.

Die Folgen solcher SR induzierten Überschwemmungen bzw. SF können wie bereits zu Beginn und in Kapitel 2.1.5 angesprochen, sehr vielfältig sein und verheerende Konsequenzen mit sich bringen. Grundlegendes Problem im Kontext von SF bilden dabei immer die zeitliche wie räumliche Begrenztheit der Ereignisskalen, sowie die Intensität der beteiligten hydrometeorologischen Prozesse (Borga et al., 2014).

2.2.2 Prozessverständnis und teilhabende Prozesse

Als Teil des natürlichen Wasserkreislaufs können SF über die Komponenten der allgemeinen Wasserhaushaltsgleichung beschrieben werden (Vischer and Huber, 2003):

$$N = V + A \pm R \quad (1)$$

(N: Niederschlag, V: Verdunstung, A: Abfluss, R: Rückhalt (Retention))

Die langfristig sehr relevante Größe der Verdunstung ist während des SFE vernachlässigbar, wohingegen die kurzfristige Speicherleistung des Einzugsgebietes das Abflussgeschehen wesentlich beeinflusst (Patt and Jüpner, 2013). Die Wasserhaushaltsgrößen Niederschlag, Abfluss und Rückhalt sind somit die zentralen Komponenten, welche den Verlauf des Ereignisses maßgeblich steuern. Die einzelnen Komponenten sind dabei bedingt durch ein Zusammenspiel von unterschiedlichen teilhabenden Prozessen und Faktoren, deren individuelle Einflüsse sich überlagern und den Ereignisverlauf lenken. Grundlage bilden die meteorologischen Ausgangsvoraussetzungen, welche weiterführend mit den spezifischen Gebietseigenschaften interagieren (Doswell, 2001; Fohrer et al., 2016). Die Ausgangsbedingungen, sowie die ablaufenden Prozesse sind dabei nicht unveränderbar, sondern können auch im Verlauf des Ereignisses eine zeitliche Dynamik besitzen (Borga et al., 2011; Patt and Jüpner, 2013). Die übergeordneten, ineinander greifenden hydrologischen Prozesse der Abflussbildung, Abflusskonzentration und des Wellenverlaufs sind kennzeichnend für die Entstehung und den Verlauf des Hochwasserereignisses (Fohrer et al., 2016; Patt and Jüpner, 2013).

- Die **Abflussbildung** beschreibt dabei die Gesamtheit der Prozesse, die im EZG zur Bildung von Abfluss beitragen. Sie ist bedingt durch die naturräumliche Ausstattung, die hydrometeorologischen Rahmbedingungen sowie durch anthropogene Einflüsse (Fohrer et al., 2016).

Der abflusswirksame Anteil des Niederschlags kann über den Abflusskoeffizienten beschrieben werden. Dieser bildet den Quotienten aus der über einen festgelegten Zeitraum abgeflossenen Wassermenge und der zeitlich - räumlich zugehörigen Niederschlagsmenge. Der Abflusskoeffizient kann Werte zwischen 0 (vollständiger Rückhalt) und 1 (kein Rückhalt) annehmen (Fohrer et al., 2016; Patt and Jüpner, 2013). Über den Kennwert kann ein Vergleich verschiedener EZG hinsichtlich der Art und Weise, wie das Gebiet auf den Niederschlagsinput reagiert, erfolgen (Marchi et al., 2010). Grundlegend nehmen dabei die Merkmale Niederschlag (Menge, Dauer, Intensität), Bodeneigenschaften (Art, Gefüge, Aufbau), Vegetation (Landnutzung) und Topographie Einfluss auf die Abflussbildung im EZG (Fohrer et al., 2016; Grillakis et al., 2016; Patt and Jüpner, 2013).

Des Weiteren verstärken anthropogene Faktoren, wie die Flächenverdichtung und -versiegelung, über eine stark herabgesetzte Infiltrations- und Speicherkapazität der Flächen, die Abflussbildung erheblich (Hatzfeld et al., 2009; Hütte, 2000). Auch die Bodenvorfeuchte hat sich bei SF als signifikante Einflusskomponente und stark ausschlaggebende Bodenkomponente herausgestellt (Borga et al., 2014; Borga et al., 2011; Grillakis et al., 2016). Die Unterschiede der Abflusskoeffizienten bei trockenen bzw. feuchten Bedingungen sind dabei signifikant (Borga et al., 2011). Bei zunehmender Bodenvorfeuchte steigt der abflusswirksame Anteil des Niederschlags, da die Wasseraufnahmekapazität aufgrund der Vorsättigung herabgesetzt ist (Borga et al., 2007; Grillakis et al., 2016). Für SFE in kontinentalen Regionen Europas nimmt Marchi et al. (2010) zudem an, dass zur Bildung von SF hohe Vorfeuchten erforderlich sind. Eine Fallstudie von Grillakis et al. (2016) zeigt, dass der Einfluss der Vorfeuchtebedingungen auf das Ausmaß einer SF abhängig ist von der Größenordnung des SFE. Bei kleineren SFE beeinflussen die Vorfeuchtebedingungen die Scheitelabflüsse deutlich stärker (positiver Einfluss) als bei großen SFE. Grundlegend besteht bei Hochwasserereignissen meist ein klarer Zusammenhang zwischen steigender Niederschlagshöhe und steigenden Abflusskoeffizienten. Dieser Zusammenhang hat sich bei SF als weniger deutlich herausgestellt. Vielmehr scheint es einen stärkeren Zusammenhang zwischen Abflusskoeffizient und Niederschlagsintensität zu geben (Merz and Blöschl, 2003). Die Analyse bisheriger Ereignisse zeigt, dass die Abflusskoeffizienten bei SFE nahezu über den gesamten Wertebereich variieren können (Borga et al., 2011; Merz and Blöschl, 2003). In der Studie von Borga et al. (2011) liegen die Abflusskoeffizienten der untersuchten SF im Mittel bei 0,35. Für die SF von Braunsbach (BW) wurde ein Abflusskoeffizient von 0,75 ermittelt (Rutschmann, 2017).

- Unter **Abflusskonzentration** versteht man die Prozesse des Zusammenfließens des Wassers auf und unter der Landoberfläche bis hin zum Gewässer (Fohrer et al., 2016). Grundlegende Steuerparameter bilden die Gebietscharakteristika Geländegefälle, Rückhaltevermögen, Bewuchs und Topographie (Hapuarachchi et al., 2011; Patt and Jüpner, 2013). Bei SRE fließt ein Großteil des Niederschlagswassers oberirdisch ab. Grund dafür ist die hohe Niederschlagsintensität. Diese bewirkt, dass die Infiltrationskapazität der Böden überschritten (Horton'scher Oberflächenabfluss, HOF) und/oder die maximale Speicherkapazität der Böden erreicht wird (Sättigungsflächenabfluss, SFA), sodass es zu Oberflächenabfluss kommt (Borga et al., 2014; Patt and Jüpner, 2013). Der Oberflächenabfluss steuert dementsprechend den überwiegenden Teil des gebildeten Direktabflusses während eines SFE bei (Borga et al., 2014). Eine geringe Oberflächenrauigkeit, ein geringer Gebietsrückhalt sowie ein starkes Geländegefälle begünstigen dabei eine schnelle Abflusskonzentration und können an der Bodenoberfläche zu sehr hohen Fließgeschwindigkeiten führen (Marchi et al., 2010). Die hohen Fließgeschwindigkeiten können im Verlauf eines Ereignisses zur Verschlammung der Böden beitragen und das Abflussgeschehen auf diese Weise weiter intensivieren (Bronstert et al., 2017a). Da der Bewuchs maßgeblich Einfluss auf die Oberflächenrauigkeit nimmt, stellen der Grad der Pflanzenbedeckung (Landnutzung) und der Grad der Versiegelung wichtige Parameter bei der Abflusskonzentration dar (Bronstert et al., 2017b; Grillakis et al., 2016; Patt and Jüpner, 2013). Bei SFE läuft der Prozess der Abflusskonzentration aufgrund der räumlichen Begrenztheit und Intensität des Ereignisses sehr schnell ab und führt zu einer ausgeprägten Hochwasserwelle (Merz and Blöschl, 2003).
- Der **Wellenverlauf** einer Hochwasserwelle wird grundlegend über die Eigenschaften Retention bzw. Dispersion (Wellenverformung durch Verzögerung/Rückhalt des Abflusses) und die Translation (Wellenverschiebung von Oberstrom nach Unterstrom) charakterisiert (Fohrer et al., 2016; Patt and Jüpner, 2013). Diese Eigenschaften sind EZG spezifisch und werden durch die natürlichen Gegebenheiten (bspw. Gewässernetz, Fließgefälle, Topographie, Ausuferungs- und Rückhaltevermögen) und die anthropogenen Einflüsse (bspw. Abschneiden von natürlichen Ausuferungsflächen, Eindeichungen) bedingt (Patt and Jüpner, 2013). Jede Direktabflusswelle wird so auf ihrem Weg durch das Gelände verformt. Steile EZG haben große Translations- und geringe Retentionseigenschaften. Auch in EZG mit hohem Versiegelungsgrad spielt die Retention meist eine untergeordnete Rolle (Patt and Jüpner, 2013). Bei SF zeigt sich aufgrund der schnellen Abflussreaktion charakteristischer

Weise eine sehr steile Abflussganglinie (vgl. Tab. 2.2, (Bronstert et al., 2017a; Munich RE, 2017)). Die Form der Hochwasserganglinie spiegelt dabei die Energie und Intensität des SFE wieder (Bronstert et al., 2017a; Patt and Jüpner, 2013).

Die genannten Prozesse bilden das Ergebnis des Zusammenspiels der Niederschlags-situation mit den naturräumlichen Gegebenheiten und der im EZG ablaufenden hydrologischen Teilprozesse. Die beschriebenen Einflussparameter bilden dabei die Faktoren, die sich bei der Analyse vergangener SFE als besonders grundlegend und kennzeichnend für das Prozessverständnis von SF erwiesen haben. Zur Veranschaulichung der relevanten Faktoren und Prozesse sind in Abb. 2.4 die aus der Literatur erlangten Kenntnisse schematisch zusammengetragen (vgl. Kap. 2.1.5). Auch die Hauptproblemaspekte von SF (bspw. hohe Fließgeschwindigkeiten, Erosion, Überlastung von Schutzeinrichtungen, urbane Problemaspekte, schnell anschwellende Fließgewässer,...) sind mit Blick auf ein ganzheitliches Verständnis in der Grafik mit aufgegriffen.

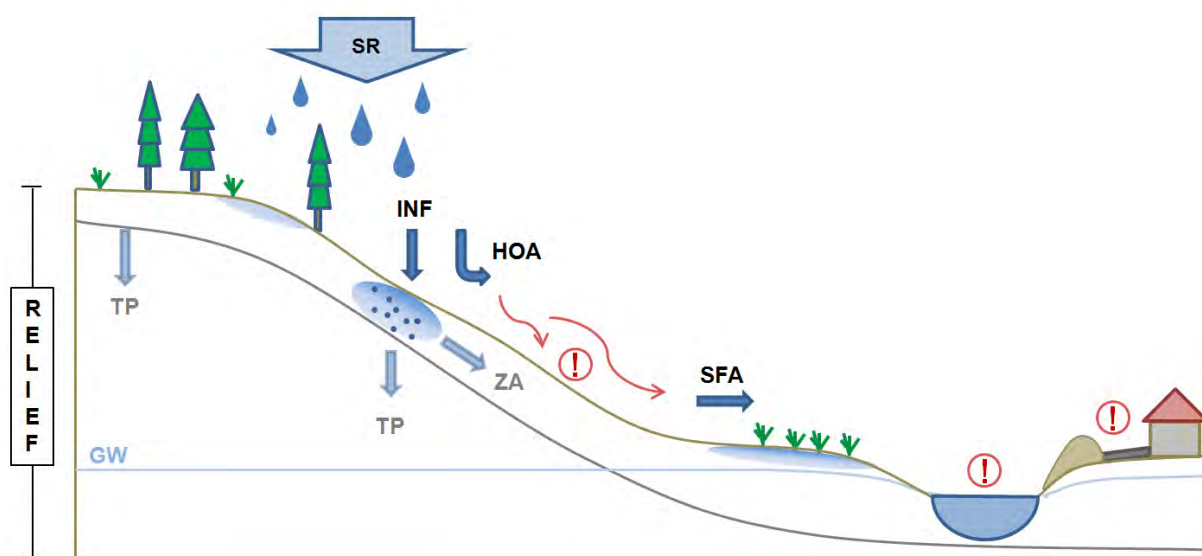


Abbildung 2.4: Bildung von SF, Prozesse: Starkregen (SR), Horton'scher Oberflächenabfluss (HOA), Sättigungsflächenabfluss (SFA), Infiltration (INF), Zwischenabfluss (ZA), Tiefenperkolation (TP), Grundwasserspiegel (GW); Faktoren: Relief, Bodenfeuchte (blaue Ovale), Landnutzung, Versiegelung. Die Ausrufezeichen stehen für Problemaspekte bei SF (Kap. 2.1.5, eigene Darstellung).

2.2.3 Trends im Auftreten

Die in Kapitel 2.1.3 angesprochenen, prognostizierten Trends im Niederschlagsgeschehen könnten aufgrund der engen Kopplung der Prozesse zu einer zukünftigen Zunahme von SFE führen. Wie zuvor erwähnt, wurde bereits eine Zunahme der erosionsrelevanten Niederschläge beobachtet (vgl. Kapitel 2.1.3). Dahingehend wird auch mit einem vermehrten zukünftigen Auftreten von SF gerechnet (Hapuarachchi et al., 2011). Dieser Erkenntnisstand ist bisher je-

doch noch wenig gesichert und die Langzeitaussagen mit hohen Unsicherheiten belastet (Borga et al., 2011).

Abgesehen von der Langzeitentwicklung haben sich räumliche und saisonale Muster im Auftreten von SF herausgestellt. Den saisonalen Starkregentrends folgend, treten SF besonders häufig im Sommer bzw. Spätsommer auf, wenn der Wasserkreislauf aufgrund der warmen Temperaturen intensiviert ist (vgl. Kapitel 2.1.1) (Merz and Blöschl, 2003). Dieser Zusammenhang gilt besonders für die kontinentaleren Regionen in Europa (bspw. Deutschland, Österreich, Rumänien). In den mediterranen bzw. alpin-mediterranen Regionen (bspw. Italien, Frankreich, Slowenien) treten SF aufgrund anderer klimatischer Grundbedingungen vermehrt im Herbst auf (Borga et al., 2011). In diesen Regionen ist das räumliche und zeitliche Ausmaß der SFE meist höher sowie das Sturzflutregime meist intensiver als das der Kontinentalregionen (Marchi et al., 2010).

2.2.4 Methoden der Analyse und Vorhersage

Aufgrund zunehmender Präsenz und Relevanz der SF Thematik in den letzten Dekaden wurden in vielen Teilen der Welt, wie auch in Deutschland, verstärkt Forderungen hinsichtlich verbesserter Prognosen laut (Hapuarachchi et al., 2011; LUBW, 2016). Als Reaktion wurden Fortschritte bei der Vorhersage von SF durch eine Reihe an Entwicklungen in den Beobachtungstechniken/ bzw. -netzwerken sowie bei den Modellierungstechniken erzielt (Gourley et al., 2014; Hapuarachchi et al., 2011). In Folge dieser Entwicklungen hat sich die Vorhersagefähigkeit von SFE in den letzten Jahren erheblich verbessert, dennoch ist sie noch immer unzureichend (Hapuarachchi et al., 2011). Dies liegt zum einen an der limitierten Vorhersagbarkeit des auslösenden SRE, aber auch an der komplexen Genese von SF, die von den Modellen nur bedingt wiedergegeben werden kann. Ein Grund hierfür liegt im noch nicht ausreichendem Verständnis der Steuerparameter, welche das SFE lenken (Borga et al., 2014; Gourley et al., 2014). Häufig ist auch die Verfügbarkeit der notwendigen Grundlagendaten (bspw. Abflussdaten) problematisch, da SF oftmals in wenig oder gar nicht beobachteten EZG auftreten (Borga et al., 2014; Hapuarachchi et al., 2011). Ebenso sind Daten und Erkenntnisse zu früheren SFE meist über Gemeinden, Unternehmen und Forschungseinrichtungen in unveröffentlichten Berichten verstreut und stehen, wenn überhaupt, nur mit sehr viel Aufwand zur Verfügung (Gauze et al., 2009). Um diesem Problem zu begegnen, wurde in den letzten Jahren im Rahmen von wissenschaftlichen Projekten begonnen, frei zugängliche Datenbanken zu SFE aufzubauen.

en, welche die Entwicklungen, den Wissenstransfer und das Prozessverständnis hinsichtlich SF vorantreiben sollen (Borga et al., 2011; Gaume et al., 2009; Hatzfeld, 2009).

Wegen des spontanen und lokalen Auftretens von SF ist es zudem schwierig während der Ereignisse Messungen durchzuführen oder die Stärke der teilhabenden Prozesse zu analysieren (Borga et al., 2014; Bronstert et al., 2017a). Ebenso ist es problematisch, SF unter kontrollierten Bedingungen bzw. anhand von Feldversuchen zu untersuchen, da die Planung solcher Projekte aufgrund der Ungewissheit von Ereignisort und -zeit nicht möglich ist (Borga et al., 2010). Die Analyse und Quantifizierung der ablaufenden Prozesse muss somit retrospektiv, anhand einer Rekonstruktion der Ereignisse, erfolgen. Methodisch kann diese mithilfe einer forensischen Ereignisanalyse bzw. „Post-Event-Analyse“ durchgeführt werden (Bronstert et al., 2017a; IRDR, 2011). Die retrospektive Rekonstruktion des Ereignisses ermöglicht es, die Ursachen und Mechanismen des Ereignisablaufs und der Schadensentstehung differenziert betrachten und analysieren zu können. Hierbei kommen unterschiedliche Methoden zur Auswertung der räumlich, zeitlich oder thematisch verwandten Daten, sowie verschiedene Mess- und Modellierungsansätze zur Anwendung (Bronstert et al., 2017a). Ziel dabei ist das lückenhafte Bild durch eine systematische, wissenschaftliche Vorgehensweise zu vervollständigen (Bronstert et al., 2017a; IRDR, 2011). Auch Gebietsbegehungen sowie Augenzeugenberichte liefern hier wertvolle Hinweise, die zu einem verbesserten Prozessverständnis beitragen. Ereignisberichte zu vergangenen SF stellen daher wichtige Informationsquellen dar (Bronstert et al., 2017a; Maiwald and Schwarz, 2016; Rutschmann, 2017; Vogel et al., 2017).

Aufgrund des sehr hohen Aufwands derartiger Ereignisanalysen werden diese bisher nur für wenige, meist extreme SFE durchgeführt (Rutschmann, 2017). Der Betrachtungsfokus dieser Methode liegt somit auf einzelnen Ereignissen. So liegt für Braunsbach beispielsweise eine ausführliche Ereignisanalyse vor, für die Vielzahl weiterer Ereignisse sind jedoch keine derartigen Auswertungen bekannt. Auch über vergleichende Analysen bisheriger SFE in BW liegen keine Studien vor.

Die Anfälligkeit von EZG für bestimmte Naturgefahren (bspw. SF oder Murgänge), wurden in der Vergangenheit bereits mithilfe verschiedener statistischer Analysemethoden betrachtet und differenziert (Borga et al., 2014). Speziell wurden dabei multivariate Verfahren wie Logistische Regressionen oder Diskriminanzanalysen zur Analyse von Kausalzusammenhängen verwendet, um verschiedene Variableneinflüsse auf das Eintreten von Ereignissen zu identifizieren, zu vergleichen und zu quantifizieren (Bertrand et al., 2013; Diakakis et al., 2016; Pradhan

and Lee, 2010; Youssef et al., 2016). Die Verfahren erlauben dabei eine Analyse von einer Vielzahl an unabhängigen Parametern (bspw. meteorologische, geomorphologische) zugleich. Speziell im Zusammenhang mit urbanen SF wurden LR bereits mitunter zur Kartierung von Auftretenswahrscheinlichkeiten bzw. Anfälligkeiten/Gefährdung verschiedener Stadtteile im Hinblick auf Überschwemmungen durch SF eingesetzt (Diakakis et al., 2016; Youssef et al., 2016). So konnte Diakakis (2016) signifikante Einflussunterschiede der analysierten Parameter (Bodenversiegelung, kumulierte Niederschlagsmenge, EZG, Entfernung vom Gewässer, Geländeneigung, Geländehöhe ü. NN) im Hinblick auf das Auftreten von Überschwemmungen durch SF feststellen. Als ausschlaggebendste Faktoren erweisen sich die Bodenversiegelung, die Geländeneigung und die kumulierte Niederschlagsmenge. In einer weiteren Studie von Youssef et al. (2016) wurden die Faktoren Geländeneigung, Geländehöhe, Krümmung, Landnutzung, Geologie, Bodendurchlässigkeit und die Entfernung vom Gewässer anhand einer LR analysiert. Als stärkste Einflusskomponente wurde ebenso die Geländeneigung identifiziert, gefolgt von der Landnutzung und der Geländehöhe. Die anderen Faktoreinflüsse waren weniger signifikant. Statistische Modelle ermöglichen es, somit Variableneinflüsse zu identifizieren und die Relevanz der Faktoren auf die Bildung von SF einzuordnen.

Das Verständnis der beteiligten und ausschlaggebenden Prozesse ist für die Modellierung der Abflussereignisse von hohem Stellenwert (Borga et al., 2011). Die Inputdaten und die Tatsache, wie gut das Modell als vereinfachtes Abbild die komplexe Realität wiedergeben kann, bestimmen die Qualität der Modellierung und Vorhersage (Hapuarachchi et al., 2011). Für ein geeignetes SF-Management ist die Qualität der Modellierung und Vorhersage entscheidend (Borga et al., 2010). Besonders in urbanen Gebieten ist die Modellierung von SFE aufgrund der vielzähligen anthropogenen Einflussfaktoren extrem komplex (Hapuarachchi et al., 2011; Diakakis et al., 2016). Zur Abschätzung seltener Hochwasserabflüsse werden bevorzugt extremwertstatistische Methoden, regionalhydrologische Methoden oder Niederschlags-Abfluss Modelle (NA-Modelle) eingesetzt (Viviroli, 2013).

- **Extremwertstatistische Methoden** eignen sich im Falle von SF dabei meist weniger, da hier für die Kalibrierung langfristige Datenreihen benötigt werden, welche bei SFE selten vorliegen (Steinbrich et al., 2015). Grundsätzlich haben die datengesteuerten Modelle, die statistische Beziehungen nutzen (abgeleitet aus Niederschlags- und Abflussdaten), den Vorteil, bei mangelnden Prozesskenntnissen akzeptable Ergebnisse zu liefern. Die abgeleiteten statistischen Beziehungen sind jedoch lediglich ortsspezifisch, sodass es sich wenig für die allgemeine SF Vorhersagen eignet (Hapuarachchi et al., 2011).

- **Regionalhydrologische Modelle** arbeiten hingegen mit einer Regionalisierung von hydrologischen Kennwerten. Diese Ansätze sind meist besser geeignet. Die Idee dahinter: Hydrologische Modellgrößen oder -Parameter anhand von flächendeckend vorhandenen Gebietskennwerten zu bestimmen oder die vorhandenen Messungen auf ungemessene Räume zu übertragen (Viviroli, 2013). Auch hier sind jedoch langzeitliche Datenreihen zur Modellkalibrierung notwendig. Diese Modelle haben zudem eine schlechte Auflösung für SFE, die räumliche/ zeitliche Variabilität der Prozesse bleibt unberücksichtigt und die Übertragbarkeit auf unbeobachtete EZG ist sehr begrenzt (Hapuarachchi et al., 2011).

Allerdings vernachlässigen beide der beschriebenen Methoden die spezifischen und dynamischen Entstehungsbedingungen der Ereignisse (Viviroli, 2013). Um diese Einschränkungen zu minimieren und den aufkommenden Forderungen der „Prediction in ungauged Basins“ Initiative zu entsprechen, fand eine Weiterentwicklung der Modelle statt (Borga et al., 2011; Hrachowitz et al., 2013). Ziel war ein grundlegend verbessertes Prozessverständnis, eine Verbesserung der Modellierfähigkeiten, innovativere Modelle, Berücksichtigung der räumlichen und zeitlichen Variabilität der Prozesse sowie die Minimierung der notwendigen Kalibrierung um auch verlässliche Vorhersagen für unbeobachtete Gebiete tätigen zu können (Hrachowitz et al., 2013). In jüngerer Vergangenheit und mit zunehmender Datenverfügbarkeit ist man daher verstärkt dazu übergegangen, räumlich teil-/verteilte Modelle zur SF Vorhersage zu verwenden (Hapuarachchi et al., 2011). Hierbei gehen zunehmend hochaufgelöste Flächendaten aus der Fernerkundung (bspw. Radar, Satellit: Mikrowellen- & Infrarotbeobachtungen) in die Modellierung von SFE ein. Speziell Radardaten spielen hier eine wichtige Rolle, da sie eine ideale Datenquelle für raumbezogene Niederschlagsanalysen darstellen und so einen Eckpfeiler für die Analyse und Prognose von SF bilden (Kapitel 2.1.2) (Borga et al., 2011; Pfister et al., 2015).

- Bei **räumlich teil-/verteilten Modellen** sind die Modellparameter überwiegend physikalisch basiert, sodass für die Parameterkalibrierung meist keine Langzeitdatenreihen erforderlich sind. Daher sind sie für die Vorhersage von Ereignissen in unbeobachteten EZG geeignet und liefern gute Ergebnisse. Diese Modelle sind allerdings sehr rechenintensiv und benötigen qualitativ hochwertige EZG Daten als Input. Dies schränkt ihre Anwendbarkeit ein (Hapuarachchi et al., 2011). NA-Modelle finden hier ihre Anwendung (Viviroli, 2013).

Auf Basis der drei Verfahrensgruppen haben sich über die Jahre eine Vielzahl an Modellen mit unterschiedlichen Schwerpunkten und Herangehensweisen entwickelt (Liebscher and Mendel, 2010). Je nach Modellvariante stehen dabei verschiedene Modell Aspekte, wie bspw. die Simu-

lation einzelner Ereignisse oder längerer Zeiträume, die Modellierung statistischer oder physikalischer Gesetzmäßigkeiten, die räumliche Variabilität bzw. Differenziertheit des Modells oder gegenteiliges, die Kalibrierung oder auch fehlende Kalibrierung des Modells, stärker im Vordergrund (Krier, 2017; Liebscher and Mendel, 2010). Als sehr vorteilhaft in Bezug auf die hohen Prozessgeschwindigkeiten bei SF und die Einsatzfähigkeit der Methode durch verschiedene lokale Interessensgruppen, haben sich auch die vereinfachten, schwellenwertbasierten Modellierungsansätze erwiesen (Borga et al., 2014; Hardy et al., 2016; Hapuarachchi et al., 2011; Javelle et al., 2010). Einen verbreiteten Ansatz, welcher auch verstärkt im Kontext von SF zum Einsatz kommt, bildet dabei das Flash Flood Guidance (FFG) Konzept. Die zentrale Idee des Verfahrens ist es, einen Niederschlagsschwellenwert abzuleiten, welcher am EZG-Auslass einen bordvollen Abfluss (bzw. angesetzten Schwellenwertabfluss) hervorruft (Gourley et al., 2014). Wird dieser FFG-Wert von der für das EZG prognostizierten Niederschlagshöhe überschritten, wird eine Überschwemmung im EZG als wahrscheinlich angesehen. Die FFG-Technik kann jedoch weder den Zeitpunkt noch den Ort der Überschwemmung voraussagen (Borga et al., 2014). Diese Methodik wird in Teilen der Welt bereits für „SF-Uhren“ zur Gefährdungsabschätzung verwendet (Gourley et al., 2014).

Ein Modell, welches künftig zur flächendeckenden Gefährdungsabschätzung durch SF als Folge von SR in BW eingesetzt werden soll, ist das Modell RoGeR (Runoff Generation Research) (Steinbrich et al., 2015). Dieses wurde an der Professur für Hydrologie in Freiburg entwickelt. RoGeR ist ein ereignisbasiertes, unkalibriertes NA-Modell, welches skalenübergreifend (Plot bis EZG Skala) anwendbar ist und die verschiedenen Abflussbildungsprozesse in der Fläche für unterschiedliche Niederschlagsereignistypen (kurze SR/ lange ergiebige Landregen) bei variablen Vorfeuchtebedingungen in hoher zeitlicher (bis 1 min) und räumlicher Auflösung (bis 1 m²) simuliert (Steinbrich et al., 2015).

2.2.5 Management

Im SF Management sollen die Strukturen und Mechanismen für ein schnelles, effektives und geordnetes Handeln geschaffen werden, sodass die negativen Auswirkungen von SF frühzeitig eingegrenzt werden können (Hatzfeld, 2009). Das Risiko- und Gefahrenmanagement besteht dabei aus einer Abfolge systematischer Maßnahmen zur Vorsorge, Reaktion und Wiederherstellung. Für ein langfristiges und nachhaltiges Risikomanagement müssen dabei auch zukünftige Entwicklungsszenarien mit einbezogen werden. Die vorbeugenden und direkt anwendbaren Maßnahmen müssen in Übereinstimmung mit den Merkmalen von SF stehen (z.B. verkürz-

te Fristen; kurze bis vernachlässigbare Warndauer; unmittelbare Bedrohung für Leben und Eigentum; Bedarf an Zufluchtsorten und sicheren Orten; spontane und effiziente organisatorische Reaktionspflichten). Anwendung finden hier strukturelle Maßnahmen (bspw. Rückhaltebecken,...) sowie nicht-strukturelle Maßnahmen (Warnsysteme, Flächennutzungsplanung,...) (Borga et al., 2011; Pinto et al., 2015). Die Ausweisung von Risikobereichen ist dahingehend ein Anfang, dennoch wird hier bisher überwiegend das Hochwasserrisiko adressiert. Die mit SF häufig eingehenderen Begleit- bzw. Folgeprozesse, wie bspw. Erdrutsche oder Verlagerungen des Gewässerbetts, werden bisher nur wenig berücksichtigt. Zukünftig sollten daher Multi-Risiko-Ansätze verfolgt werden, welche die „Multi-Gefahren-Natur“ von SF stärker berücksichtigen (Borga et al., 2011). Eine weitere Herausforderung besteht zudem bei der Integration von wissenschaftlichen Risikovorhersagen in die allgemeinen Entscheidungs- und Handlungsabläufe. Die Bewältigung dieser Aufgabe ist für den Umgang mit SF unerlässlich. Zur Nutzung des lokalen Fachwissens sowie zur Förderung der öffentlichen Akzeptanz und Partizipation sollen zukünftig gleichermaßen „bottom-up“ wie „top-down“ Ansätze Anwendung finden und zu einem verbesserten und nachhaltigem SF Management beitragen (Borga et al., 2011).

3. Zielsetzung und Forschungsfragen

Aufgrund der dargestellten aktuellen sowie zukünftigen Relevanz von SR und SF, sollen für den Raum BW die Bedingungen, unter welchen in der Vergangenheit SF aufgetreten sind, genauer analysiert werden. Speziell sollen dabei die auslösenden SR betrachtet werden, um auf Basis von möglichen Niederschlagscharakteristiken eine differenziertere Einordnung im Hinblick auf die SR Eigenschaften, welche SF hervorrufen oder begünstigen, zu ermöglichen. Eine derartige landesweite, vergleichende Untersuchung von vergangenen SRE existiert für BW bisher nicht. Als Ausgangspunkt sollen dabei bekannte und beobachtete SFE verwendet werden. Darüber hinaus soll untersucht werden, wo und wie häufig in der Vergangenheit ähnliche Niederschlagscharakteristiken in BW aufgetreten sind, dort jedoch zu keiner bekannten SF geführt haben. Auf diese Weise kann aus zwei Richtungen untersucht werden, wo und wann SF auftreten und welche Niederschlagsmerkmale ausschlaggebend sind.

Um bei ähnlicher Niederschlagscharakteristik besser beurteilen zu können, warum keine SF ausgelöst bzw. beobachtet wurde, werden neben den Niederschlagsparametern auch SF-bildungsrelevante Gebietsparameter in die Auswertung mit einbezogen. Aufgrund des häufigen Auftretens von SF in unbeobachteten EZG, sollen - im Sinne der allgemeingültigen Betrachtung - flächendeckend zur Verfügung stehende Gebietsdaten verwendet werden.

Auch soll sich zeigen, ob die identifizierten Zusammenhänge für BW letztendlich mit denen aus der aktuellen Forschung übereinstimmen (vgl. Kap. 2).

Zusammenfassend lassen sich die folgenden übergeordneten Forschungsfragen ableiten:

1. Wo und wie häufig sind in der Vergangenheit im BW SFE aufgetreten, zeigen sich Trends? (F1)
2. Welche SR- Charakteristiken haben in der Vergangenheit in BW zu SFE geführt? (F2)
3. Wo und wie häufig sind ähnliche Niederschlagssituationen in BW aufgetreten die jedoch keine SFE (soweit bekannt) ausgelöst haben? (F3)
4. Was hat dazu geführt, dass bei ähnlicher SR-Charakteristik an einem Ort SF auftreten und an anderen nicht - welche Faktoren (Parameter) sind ausschlaggebend? (F4)

Für die Analyse der Niederschlagssituation soll mit Radardaten gearbeitet werden, da diese sich für die Analyse von SR als besonders geeignet herausgestellt haben und im operationellen Betrieb bereits für die Vorhersage von SR und SF eingesetzt werden. Da Radardaten eine vergleichsweise junge Form der Niederschlagsüberwachung darstellen, soll im Zuge der Analyse

auch eine bessere Einschätzung bezüglich Stärken und Schwächen bei der Verwendung dieser Daten in Bezug auf SR/ SF erlangt werden.

Im Hinblick auf die SF bildungsrelevanten Faktoren soll eine statistische Analyse die qualitativen sowie quantitativen Einflüsse der einzelnen Parameter abschätzen/ identifizieren. Konkret sollen hierfür eine Varianzanalyse sowie eine Logistische Regression verwendet werden.

Folgende Untersuchungshypothesen werden aufgestellt:

1. Es ergeben sich statistische signifikante Unterschiede für die Kennwerte der analysierten Gruppen (SF Ja/ Nein). (UH1)
2. Es können stark einflussnehmende Variablen abgegrenzt werden. (UH2)
3. Das Auftreten von SF in BW kann anhand charakteristischer Zusammenhänge zwischen den Variablen /Parameterkombinationen erklärt werden. (UH3)

Auf diese Weise soll sich zeigen, ob es möglich ist, über Zusammenhänge weniger, signifikanter Variablen die Eintrittswahrscheinlichkeit einer SF in BW zufriedenstellend zu bestimmen und dahingehend das Auftreten zu erklären.

4. Methoden und Vorgehensweise

Das methodische Vorgehen kann grundlegend in vier Schritte gegliedert werden, welche die in Kapitel 3 genannten Ziele verfolgen:

1. Auswahl und Beschaffung der Grundlagendaten
2. Aufbereitung, Analyse und Auswertung der Grundlagendaten (SFE-Analyse)
3. Gegenanalyse + Aufbereitung und Analyse der identifizierten Ereignisse
4. Vergleich der Ergebnisse aus SFE- und Gegenanalyse

Zu Beginn wurde BW als Untersuchungsgebiet für die geplanten Analysen festgelegt. Ausgangspunkt für die weiteren Vorgehensschritte bildete eine ausführliche Literaturrecherche, welche die Auswahl der Grundlagendaten lenkte und auf deren Erkenntnissen das verwendete methodische Vorgehen aufgebaut wurde. Wegweisend war dabei das erlangte Prozessverständnis zur Bildung von SF (Kap. 2, Abb. 2.4). Die Grundlagendaten (Ereignistabelle, Radardaten, Geodaten) wurden dahingehend anhand verschiedener Kriterien für das Untersuchungsgebiet ausgewählt und zusammengetragen. Sie stellten das Fundament für alle weiteren Analysen dar. Im Rahmen der SFE-Analyse wurden die in der SFE-Tabelle enthaltenen Ereignisdaten zunächst auf grundlegende räumliche sowie zeitliche Zusammenhänge untersucht. Über die anschließende Radardatenanalyse wurden die auslösenden Niederschlagsituationen der jeweiligen SFE anhand verschiedener Kennwerte charakterisiert und ausgewertet. Für die spätere statistische Analyse wurden des Weiteren die Gebietskennwerte für die EZG der bekannten SFE bestimmt. In der nachfolgenden Gegenanalyse wurden SRE in BW identifiziert, welche bei einer ähnlichen Niederschlagscharakteristik zu keinen bekannten SFE geführt haben. Auch für diese Ereignisse wurden analog die Niederschlags- und Gebietskennwerte bestimmt. Auf diese Weise wurde eine Vergleichsgrundlage zu den bekannten SFE geschaffen. Die Ereignisse aus der SFE-Analyse wurden als „SF ja“-Ereignisse und die aus der Gegenanalyse als „SF nein“-Ereignisse (NSFE) klassifiziert. Für die in der Gegenanalyse identifizierten Ereignisse wurde zudem das quantitative und räumliche Auftreten näher analysiert. Zuletzt wurden die Ergebnisse aus der Ereignis- und Gegenanalyse zusammengeführt und vergleichend ausgewertet.

Die Datenanalyse wurde vordergründig in der Analysesoftware R durchgeführt (R Core Team, 2017). Unterstützend wurde die GIS-Software ArcMap als Analyse- und Darstellungswerkzeug verwendet (ESRI, 2011).

Die einzelnen methodischen Vorgehensschritte werden im Folgenden ausführlich erläutert und sind zum Überblick in Abb. 4.1 schematisch dargestellt.

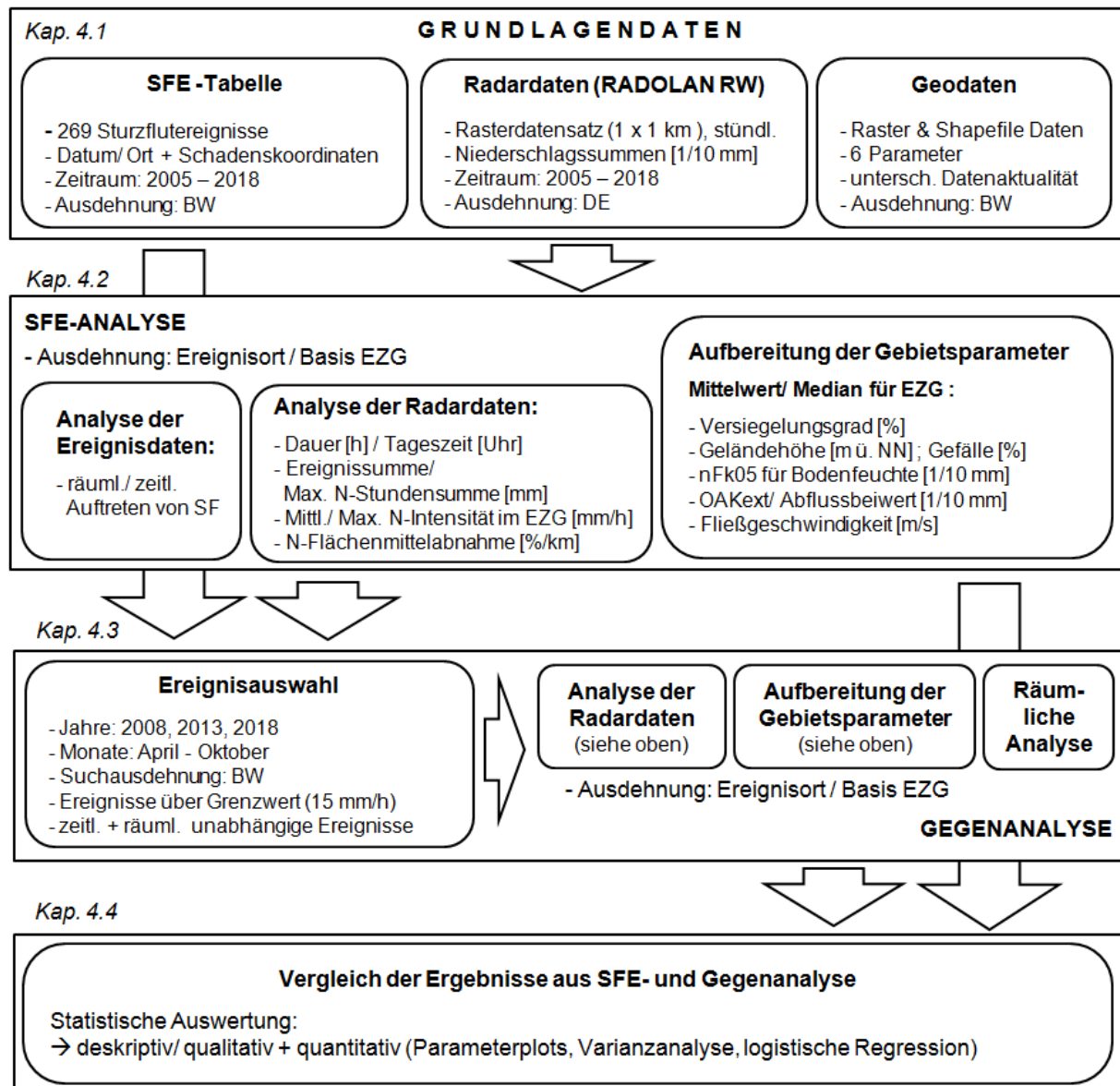


Abbildung 4.1: Schematischer Überblick zur verwendeten Vorgehensweise (eigene Darstellung).

4.1 Auswahl der Grundlagendaten

4.1.1 SFE-Tabelle

Ziel: Aktuellen Ereigniskatalog (SFE-Tabelle) zu vergangenen SFE als Analysegrundlage erstellen

Als Ausgangspunkt für die geplanten Analysen wurde ein aktueller Datensatz zu bekannten, vergangenen SFE in BW benötigt. Konkret für SF existiert, soweit bekannt, bisher keine derartige, landesweite Zusammenstellung. Es existiert jedoch eine tabellarische Auflistung zu vergangenen SRE in BW mit folgenschweren Auswirkungen. Diese wurde von Herrn Krause (Landratsamt Breisgau-Hochschwarzwald, Fachbereich Wasser & Boden) im Rahmen der Mitarbeit am BW Leitfaden zum kommunalen SR-Risikomanagement erstellt. Der Datensatz enthält 299 SRE aus dem Zeitraum von 1980 – 2015, mit vollständigen Angaben zum Ereignisdatum und Ereignisort (Ort, Schadenskoordinaten). Die SRE wurden dabei nach einem subjektiven Raster anhand verschiedener Kriterien manuell ausgewählt. Aufgelistet sind SRE, welche aufgrund einer außergewöhnlich hohen Niederschlagsintensität zu Überschwemmungen, zu erhöhtem Feststofftransport bzw. Schlammfluten oder Erdrutschen geführt haben und aufgrund von Schäden an Häusern/ öffentlicher Infrastruktur oder ähnlichem als besonders folgenschwer einzuordnen waren. Überschwemmungen durch SR, welche sich überwiegend aufgrund überlasteter Entwässerungssysteme bildeten, wurden nach Möglichkeit nicht berücksichtigt. Die exakte Verortung der Ereignisse (Findung der Schadenskoordinaten) wurde bestmöglich, anhand der zur Verfügung stehenden Ereignisinformationen, bestimmt. Als Datenquellen wurde schwerpunktmäßig die frei zugängliche URBAS Datenbank sowie die “European Severe Weather Database“ genutzt (Hydrotec et al., 2011; European Severe Storms Laboratory, 2018). Darüber hinaus wurden öffentliche Medienberichte verwendet und Landratsämter hinsichtlich bekannter folgenreicher SR/ SF angefragt. Die Informationen bezüglich des bei der Erstellung des Datensatzes angewandten Vorgehens wurden in einem persönlichen Gespräch mit Herrn Krause am 05.02.2018 gewonnen.

Da die Kriterien, nach denen die Auswahl der SRE von Herrn Krause erfolgte, ebenso Merkmale für SFE bilden, wurde angenommen, dass die erfassten SRE zu größeren oder kleineren SF geführt haben und daher überwiegend mit SFE gleichzusetzen sind.

Um auch Aussagen zu SF der jüngeren Vergangenheit (2016 - 2018) treffen zu können, musste der Datensatz erweitert bzw. aktualisiert werden. Aus Gründen der Praktikabilität und Datenverfügbarkeit wurden dabei lediglich frei zugängliche online Medienberichte als Datenquelle verwendet. Hier wurden Internetsuchanfragen mit Eingrenzung des Veröffentlichungszeit-

raums formuliert, um Berichte zu dokumentierten SF- und SR-Auswirkungen zu finden. Des Weiteren wurden die Artikel vielzähliger lokaler- und regionaler Zeitungen BWs (u.a. Badi-sche Zeitung, Schwäbische Zeitung, Heilbronner Stimme, Rhein-Neckar Zeitung, Baden Onli-ne,...) im gewünschten Zeitfenster nach den Schlagwörtern SF und SR durchsucht. Auf Basis der Angaben in den Presseberichten konnten die Ereignisse gut differenziert und eingeordnet werden. Die verwendeten Quellen wurden in der Analysetabelle vermerkt. Konsistent zur Vor-gehensweise von Herrn Krause, wurden die Ereignisse nach den möglichst gleichen Kriterien ausgewählt. Die zugehörigen Schadenskoordinaten wurden ebenso möglichst präzise dort fest-gesetzt, wo die Auswirkungen laut der Berichte am größten waren.

4.1.2 Radardaten

Ziel: Grundlage für die Auswertung der Niederschlagscharakteristika schaffen

Für die geplanten Niederschlagsanalysen wurden qualitativ hochwertige Radardaten mit aus-reichender Zeitreihenlänge benötigt. Mit aktuell 17 C-Band Radarsystemen betreibt der DWD seit 2005 ein deutschlandweit flächendeckendes Wetterradarmessnetz, welches zur quantitati-ven Niederschlagsauswertung genutzt wird (DWD, 2018d). Neben anderen Radarstandorten (bspw. Memmingen, Offenthal) wird BW größtenteils über die baden-württembergischen Standorte Türkheim und Feldberg abgedeckt. Diese haben eine jeweilige Reichweite von 150 km um den Radarstandort (DWD, 2018d). Bei Niederschlagsmessungen mittels Radar (**“Radio detection and ranging“**) wird der bodennahe Niederschlag nicht direkt gemessen, sondern le-diglich die von den Hydrometeoren in den höheren Schichten der Atmosphäre reflektierten Signale (Winterrath et al., 2017). Die Qualität der Niederschlagsradardaten ohne Aneichung an terrestrische Niederschlagsstationen (Ombrometerdaten) hat sich für quantitative wasserwirt-schaftliche Anwendungen als unzureichend erwiesen (DWD, 2018e). Deutschlandweit stellt der DWD daher verschiedene Radarprodukte mit unterschiedlicher zeitlicher und räumlicher Auflösung in unterschiedlichen Qualitätsstufen zur Verfügung (DWD, 2018d). Je nach Daten-produkt wurden dabei bereits bestimmte Vorbearbeitungsschritte und Korrekturverfahren an-gewendet (Brasseur et al., 2017; DWD, 2016; Treis et al., 2017; Winterrath et al., 2017).

Für die weiteren Analysen wurde das nach dem RADOLAN (RADar-OnLine-Aneichung) Ver-fahren angeeichte, frei verfügbare RW-Produkt des DWD verwendet (Abb. 4.2). Dieses wurde ausgewählt, da die quantitativen Radarniederschlagsdaten hier bereits qualitätsgeprüft und an-hand verschiedener Vorbearbeitungsschritte (orographische Abschattungskorrektur, verfeinerte Z/R-Beziehungen, quantitative Kompositerstellung für Deutschland, statistische Unterdrü-

ckung von Falschechos (Clutter), Gradientenglättung und Voraneichung) überarbeitet bereitgestellt werden. Das RADOLAN-Verfahren quantifiziert zudem die radarbasierten Niederschlagsabschätzungen unter Verwendung bodengebundener absoluter Niederschlagsmessungen. Die kombinierte Verwendung dieser zwei Datenquellen liefert (Radar- und Bodenmessnetz) bisher die besten Ergebniskomposite (DWD, 2018e).

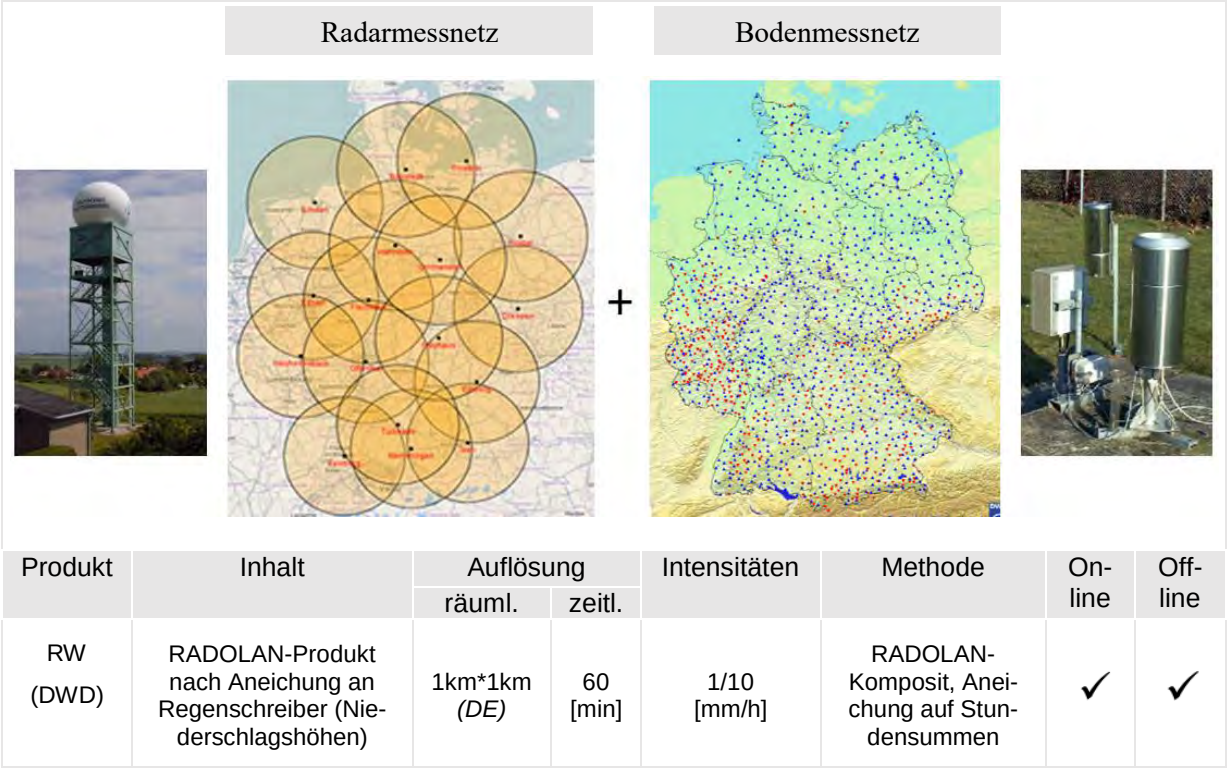


Abbildung 4.2: Übersicht des verwendeten RW Produkts und dessen Ausgangsdaten (DWD, 2018e)

Die RW Radardaten wurden automatisiert mit der Software R über den frei zugänglichen CDC FTP- Server des DWDs im Ascii– Format für die Monate der verfügbaren Jahre von 2005 bis einschließlich 2018 in deutschlandweiter Ausdehnung heruntergeladen (DWD, 2018a). Der Rasterdatensatz besitzt eine hohe räumliche und zeitliche Auflösung, liegt in polarstereographischer Projektion vor und beinhaltet die stündlichen Niederschlagshöhen für Deutschland (vgl. Abb. 4.2) (DWD, 2018e).

4.1.3 Geodaten

Ziel: Informationsgrundlage zu gebietsspezifischen Eigenschaften zusammentragen

Die Auswahl der Geodaten erfolgte anhand der im Rahmen der Literaturanalyse ermittelten, bildungsrelevanten Einflussfaktoren von SF (vgl. Abb. 2.4, Kap. 2). Schwerpunktmäßig wurden daher die oberirdischen Prozesse und Einflussfaktoren berücksichtigt. Als besonders kennzeichnend für die Bildung von SF wurden dahingehend die Gebietsparameter Versiegelung, Relief, Geländehöhe, Bodenvorfeuchte sowie Landnutzung angenommen (vgl. Kap 2.2.2, (Fohrer et al., 2016; Grillakis et al., 2016; Patt and Jüpner, 2013)).

Der Faktor Landnutzung spielt dabei unter anderem besonders aufgrund der unterschiedlichen Oberflächenrauigkeiten der Landnutzungsformen und dem resultierenden Einfluss auf die Geschwindigkeit der Abflusskonzentration an der Geländeoberfläche, eine Rolle (vgl. Kap. 2.2.2;(Fohrer et al., 2016)). Da für die verwendeten Basis-EZG (BEZG) bereits kombinierte Daten zu den mittleren Oberflächenfließgeschwindigkeiten vorlagen (Berechnungsbasis: Rauigkeitsbeiwerte der Landnutzungsklassen, hydraulischer Radius, Gefälle), wurden diese der Verwendung der einzelnen Landnutzungsklassen vorgezogen (WaBoA, 2012). Des Weiteren lagen flächenhafte Daten zu den Abflusskoeffizienten bei einem „Extrem“-Niederschlagsszenario vor (Berechnungsbasis: Vorfeuchtebedingungen, lokale Bodeneigenschaften, appliziertes Niederschlagsereignis von 127,5 mm für 1h) (Steinbrich et al., 2016). Bei dem „Extrem“-Szenario wurde der naturräumliche Bezug unter der Annahme aufgelöst, dass extreme SRE weniger durch naturräumliche Charakteristiken, wie bspw. die Topographie, sondern vielmehr über eine nicht ortsgebundene Wasserlimitierung der Atmosphäre bedingt sind. Da der Betrachtungsschwerpunkt dieser Untersuchung auf SRE beruht, wurden die Oberflächenabflusskennwerte dieses Szenarios als zweckmäßig angenommen. Für den Faktor der Bodenfeuchte wurden stellvertretend Daten zur freien nutzbaren Feldkapazität (nFK) bei einer Bodenfeuchte, die in 50% aller Tage im hydrologischen Sommerhalbjahr überschritten wird, verwendet (Klaffl, 2011). Die nFK gibt an, wie viel Wasser im Boden pflanzenverfügbar ist. Dahingehend besteht ein enger direkter Zusammenhang zur Bodenfeuchte. Umso höher die Bodenfeuchte desto höher auch die Menge des pflanzenverfügbaren Wassers. Durch die Verwendung des 50%-Perzentils, wird in dieser Arbeit angenommen, dass über die nFK-Werte die durchschnittlichen Bodenfeuchtebedingungen sowie charakteristische Verteilungsmuster der Bodenfeuchte, gut wiedergegeben werden können.

Für die grundlegende EZG-Abgrenzung wurden die Geometrien der BEZG aus dem Wasser- und Bodenatlas BW (WaBoA) verwendet (WaBoA, 2012). Die Daten zu Versiegelungsgraden [%] und Geländeneigungen [%] standen als aus dem WaBoA abgeleitete Raster zur Verfügung. Zudem lieferte der WaBoA mittlere Fließgeschwindigkeiten [m/s] für die BEZG (WaBoA, 2012). Die Geländehöhen [m ü. NN] für BW entstammen einem digitalen Geländemodell, welches der Professur für Hydrologie Freiburg im Rahmen des WaBoA-Projektes vom Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung BW bereitgestellt wurde. Die verwendeten Rasterdaten zur Bodenfeuchte (bzw. nFK) wurden im Zuge einer Diplomarbeit an der Professur für Hydrologie Freiburg aus den Ereignisdaten des Grundwassermodells GWN-BW abgeleitet (Klaffl, 2011). Hinsichtlich der Abflusskoeffizienten bei extremen Niederschlagsereignissen wurden die von der Professur für Hydrologie mit dem Modell RoGeR landesweit bestimmten Oberflächenabflusskennwerte (OAK) [1/10 mm] für das „Extrem“-Szenario verwendet (Steinbrich et al., 2016).

Alle Ausgangsraster besitzen eine räumliche Auflösung von 5 x 5 m, mit Ausnahme des digitalen Geländemodells mit 25 x 25 m. Die verwendeten Geodaten weisen unterschiedliche Datenstände im Zeitraum von 2000 – 2015 auf.

4.2 Analyse der Grundlagendaten

4.2.1 SFE-Analyse

4.2.1.1 Analyse der Ereignisdaten

Ziel: Räumliche und zeitliche Muster im Auftreten der bekannten SFE identifizieren (F1)

Die im Ereigniskatalog zusammengetragenen Ereignisse von 1980 - 2018 wurden in ihrer Gesamtheit zunächst auf grundlegende Eigenschaften untersucht. Dahingehend wurden die BW-Ereignisstandorte zunächst räumlich verortet und visuell hinsichtlich potenziellen Verteilungsmustern untersucht. Im Hinblick auf das zeitliche Auftreten wurden die Ereignisse nach Jahren und Monaten in Häufigkeitsdiagrammen dargestellt und ausgewertet.

4.2.1.2 Analyse der Radardaten

Ziel: Niederschlagscharakteristiken von SF auslösenden SR identifizieren (F2)

Aufbereitung der Radardaten

Zu Beginn wurden die nach Monaten heruntergeladenen Radarstundenraster für die verfügbaren Ereignisjahre ab Juni 2005 bis 2018 mit deutschlandweiter Ausdehnung, für die weitere Analyse des Niederschlags aufbereitet. Die Ereignisdaten vor 2005 mussten in der weiteren Analyse vernachlässigt werden, da für diesen Zeitraum keine Radardaten verfügbar waren.

Aus Gründen der Praktikabilität war es notwendig den Datensatz zunächst auf die relevanten Rasterzeitpunkte/-ausschnitte einzuschränken. Der Rasterdatensatz wurde hierzu zunächst mit den Ereignisdaten/-tagen der SFE-Tabelle abgeglichen und so aussortiert, dass lediglich Stundenraster mit direktem Ereignisbezug zu einer SF der SFE-Tabelle beibehalten wurden. Im Hinblick auf die spätere zeitliche Abgrenzung der Niederschlagsereignisse, wurde dabei ein zeitlicher Puffer von Plusminus einem Tag um das eigentliche Ereignisdatum berücksichtigt. Dies war notwendig, da eine exakte zeitliche Einordnung der Ereignisse auf Basis der Angaben in der SFE-Tabelle nicht möglich war, jedoch auch Ereignisse vollständig in die Analyse mit aufgenommen werden sollten, welche an Tagesübergängen stattgefunden haben. Ebenso sollten Ereignisse, welche bei der Erstellung des Ereigniskatalogs womöglich zeitlich ungenau eingeordnet wurden, auf diese Weise im Zuge der späteren Analyse dennoch „getroffen“ und besser zeitlich verortet werden können. Die Stundenraster mit Ereignisbezug wurden anschließend auf die Ausdehnung des Untersuchungsgebiets BW zugeschnitten. Für jedes der SF-Ereignisse ergaben sich somit 72 (24 h x 3 d) relevante Stundenraster, auf deren Basis die Niederschlagsanalyse durchgeführt wurde. Zur Vermeidung unnötig großer Datenmengen wurden

dabei keine Raster doppelt angelegt, sondern, wenn notwendig, lediglich auf die gleichen oder sich überschneidende Rasterzeitreihen zugegriffen (bspw. wenn Ereignisse am gleichen oder nachfolgenden/ vorangehenden Tag eingetreten sind). Dies verkomplizierte teilweise die Programmierung der Variablen, beschleunigte die Berechnungen jedoch erheblich.

Zeitliche Abgrenzung der Niederschlagsereignisse

Im Rahmen der Niederschlagsanalyse sollten die SRE, welche zu den bekannten SFE geführt haben, zunächst zeitlich (Zeitpunkt, Dauer) möglichst exakt abgegrenzt werden. Zur Abgrenzung eines Niederschlagsereignisses wurde, für die jeweils zu den Ereigniskordinaten zugehörige Rasterzelle (1x1 km), die gleitende Niederschlagssumme über 2 h, 3 h, 4 h, 5 h und 6 h (Dauerstufen) auf Basis der 72 h-Rasterzeitreihe berechnet. Da SF in der Regel eine Reaktionszeit von kleiner 6 h aufweisen, wurden auch lediglich SF bildungsrelevante SR Dauern von bis zu 6 h betrachtet (vgl. Kap. 2.2.1). Ob ein SRE nun 1 h oder 6 h dauerte, wurde anschließend anhand der maximalen Niederschlagsmenge der einzelnen gleitenden Niederschlagssummen festgemacht. Ausschlaggebend dabei war, ob die maximale Niederschlagssumme einer höheren Dauerstufe höher war als die der geringeren Dauerstufe. Die Dauerstufe, bei welcher das SRE die maximale Ereignissumme zuerst erreicht (ausgehend von 1 h bis hin zu 6 h), wurde als Ereignisdauer angenommen. Das SRE wurde anschließend dahingehend abgegrenzt und das reale Ereignisdatum festgelegt.

Des Weiteren sollten die Ereignisse hinsichtlich ihres tageszeitlichen Auftretens genauer eingeordnet werden. Hierfür wurden die Ereignisse in fünf verschiedene Klassen eingeteilt, wobei jeweils der Anfangszeitpunkt der abgegrenzten Ereignisse verwendet wurde:

Früher Morgen:	00:50 – 04:50 Uhr
Morgen	05:50 – 11:50 Uhr
Mittag:	12:50 – 16:50 Uhr
Abend:	17:50 – 20:50 Uhr
Nacht:	21:50 – 23:50 Uhr

Berechnung der Niederschlagskennwerte (Ereignissumme/ Max. N-Stundensumme)

Auf Grundlage der Abgrenzung des auslösenden SRE konnten im Anschluss die zugehörigen Ereignissummen sowie die maximalen Stundensummen (N-Max. Stundensumme) der SF generierenden SRE ermittelt werden. Für die Ereignissummen, wurden die stündlichen Niederschlagssummen der relevanten Rasterzelle über die Dauer des jeweiligen Ereignisses aufsum-

miert. Für die Max. N-Stundensummen wurde der maximale Niederschlagswert der relevanten Zeitsequenz (Ereigniszeitraum) verwendet.

Identifizierung der Niederschlagszellengröße

Im Weiteren wurde die Niederschlagssituation an den SFE-Orten (EO) im Hinblick auf die Größe der Niederschlagszellen untersucht. Dabei sollte, über die Abnahme des Flächenmittels (N-Flächenmittelabnahme) mit zunehmender Entfernung vom EO, die ungefähre Größe der verantwortlichen Niederschlagszelle abgeschätzt werden. Für die Berechnung wurde für jedes Ereignis das Raster mit der Max. N-Stundensumme am EO ausgewählt. Es wurde davon ausgegangen, dass die Zelle sich zu diesem Zeitpunkt möglichst mittig über dem EO verortete, sodass ein möglichst klarer Zusammenhang mit zunehmender Entfernung erkennbar wird. Da die Berechnungen auf Basis von Rastern erfolgten, konnten die Flächenmittel nicht idealtypisch für verschiedene Umkreise, ausgehend vom EO, betrachtet werden. Näherungsweise mussten daher „Rasterumkreise“ bestimmt werden (Abb. 4.3a/b). Ausgehend von dem Rasterpixel der Ereigniskoordinate, wurden die „Rasterumkreise“ mit einer Kantenlänge von 3 km, 5 km, und 7 km betrachtet. Das Ereignispixel bildete dabei immer den Mittelpunkt. Für die Berechnung der verschiedenen Flächenmittel wurden lediglich die jeweils nicht überlappenden, eigenständigen Rasterumkreise (bei 3 km 9 Rasterpixel, bei 5 km 16 Rasterpixel, bei 7 km 24 Rasterpixel) verwendet, welche in Abb. 4.3b in unterschiedlichen Blaustufen dargestellt sind. Das Flächenmittel wurde über die Mittelwerte der Niederschlagsstundensumme der jeweils relevanten Pixel berechnet. Die erhaltenen Flächenmittel der verschiedenen Rasterumkreise wurden anschließend auf den N-Max. Stundensummenwert des jeweiligen Ereignispixels normiert. Für jedes Ereignis wurden die normierten Flächenmittel in Abhängigkeit zur Entfernung des Rasterumkreises vom Rasterpixel aufgetragen und eine lineare Regression durchgeführt (Abb. 4.3c).

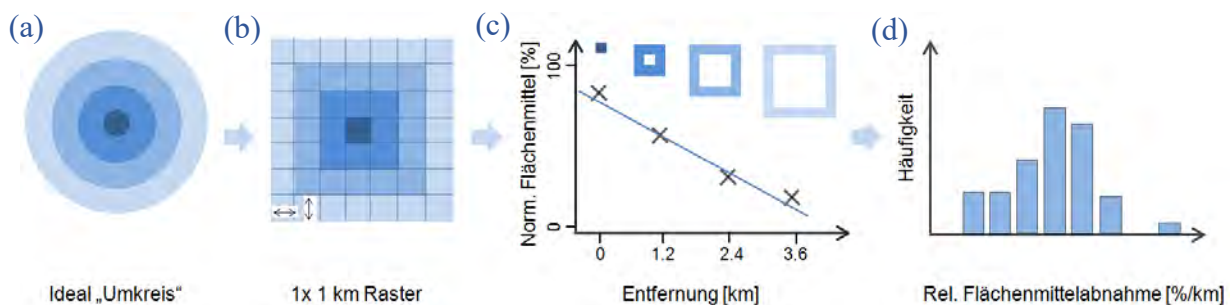


Abbildung 4.3: Schematische Darstellung des Vorgehens zur Ermittlung der relativen Flächenmittelabnahme der Niederschlagssummen [%/km]

Für die Rasterumkreise wurden dabei die Entfernungen von 1,2 km, 2,4 km und 3,6 km angenommen. Diese bilden das Ergebnis aus dem Mittelwert der kürzesten und weitesten Entfernung des jeweiligen Rasterumkreises vom Ereignispixel. Die variierenden, realen Entfernungen des Rasterumkreises (da kein Kreis, sondern Quadrat) sollten auf diese Weise möglichst genau in die Analyse mit eingehen. Im Hinblick auf die Analyse des Zusammenhangs wurde auch getestet, ob durch Verwendung einer logarithmischen Skalierung der Entfernung, sich klarere und signifikantere Zusammenhänge bei der LR ergeben. Die Methode, bei der dies der Fall war, wurde für das weitere Vorgehen verwendet.

An dieser Stelle zeigten sich jedoch verhältnismäßig viele nicht signifikante Zusammenhänge (Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$). Neben anderen möglichen Szenarien wurde daher angenommen, dass in einem Großteil dieser Fälle der EO nicht vom Zentrum der Zelle überzogen wurde und sich daher weniger klare Zusammenhänge ergeben. Um jedoch möglichst für jeden EO die auslösende Niederschlagszelle näher charakterisieren zu können, wurde im Weiteren davon ausgegangen, dass aufgrund der Kleinräumigkeit der SR-Zellen, mit hoher Wahrscheinlichkeit ein Punkt im näheren Umfeld der Ereigniskoordinate von dem Zentrum der Zelle überzogen wurde. Mit Blick auf die typische Ausdehnung von konvektiven Niederschlagszellen wurde für die weitere Analyse eine Pufferzone von 5 x 5 km um die Ereigniskoordinate angelegt (Abb. 4.4, vgl. Kap. 2.1.1).

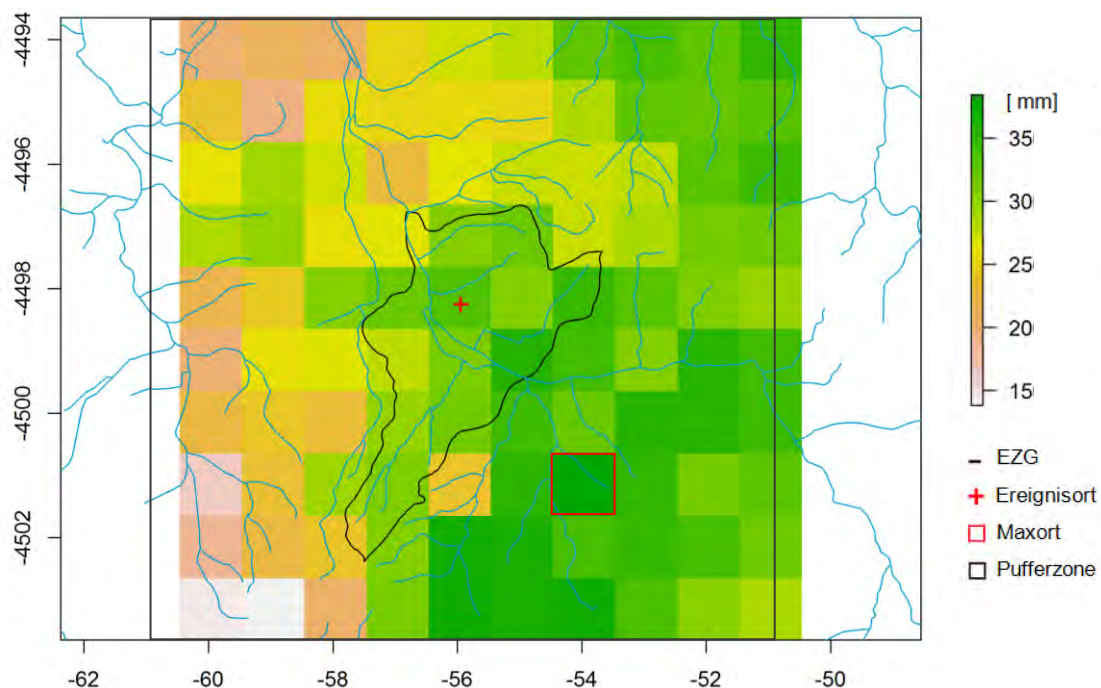


Abbildung 4.4: Beispiel für Findung des Ortes mit der maximalen N-Summe (Maxort) über den Betrachtungszeitraum (Ereignistag $\pm$ 1 Tag) eines Ereignisses

In dieser Pufferzone wurde über den jeweiligen Betrachtungszeitraum (Ereignistag ± 1) das Rasterpixel identifiziert, in dem die höchste Niederschlagssumme in dieser Zeit gefallen ist (Maxort) (Abb. 4.4). Der Einfachheit halber wurde dabei nicht näher nach der Ereignisdauer differenziert. Da SR verhältnismäßig selten auftreten, wurde hier davon ausgegangen, dass das SRE im Ereigniszeitraum den Großteil des innerhalb der drei Tage gefallenen Niederschlages generiert hat.

Vergleich der Niederschlagsbedingungen am EO und Maxort

Für die identifizierten Maxorte (MO) wurden im Folgenden die gleichen grundlegenden Kennwerte wie zuvor für die EO (Ereignisdauer, Ereignissumme, N-Max. Stundensumme) bestimmt und anschließend die Analyse der auslösenden Niederschlagzelle gleichermaßen durchgeführt. Dahingehend wurden ebenso die normierten Flächenmittel der Rasterumkreise je MO berechnet und der Zusammenhang zwischen diesen und der Entfernung mittels linearer Regressionen ausgewertet. Für die MO wurde dabei exakt die gleiche Methodik wie zuvor bei den EO verwendet. Nicht signifikante Zusammenhänge wurden mit NA („nicht verfügbar“) klassifiziert, sodass in der weiterführenden Auswertung lediglich signifikante Zusammenhänge betrachtet und diese nicht verfälscht wurden. Auf Basis der erhaltenen Ergebnisse für die MO, wurde im Folgenden auch ein Vergleich zu denen am EO erhaltenen Kennwerten angestellt.

Berechnung der EZG-Kennwerte (Mittlere N-Intensität, Max. mittlere N-Intensität)

Im Weiteren wurden die Niederschlagsbedingungen auf EZG-Ebene untersucht. Zum einen sollte sich hier zeigen, inwiefern die Niederschlagsbedingungen am EO sich zu denen im zugehörigen EZG, unterscheiden. Zum anderen sollte der Betrachtungsschwerpunkt nicht ausschließlich auf einem Ort liegen, welcher die Bedingungen im EZG womöglich nicht repräsentativ wiedergibt. Dahingehend mussten zunächst die zu den Ereigniskoordinaten zugehörigen EZG abgegrenzt werden. Die Durchführung einer sehr differenzierten EZG-Abgrenzung war, aufgrund der Größe des Untersuchungsgebiets und der hohen Anzahl an Ereignissen, nicht möglich. Hier mussten somit Vereinfachungen getroffen und auf bestehende EZG-Abgrenzungen zurückgegriffen werden. Grundsätzlich können große EZG in verschiedene kleinere Teil-EZG unterteilt werden. Die Abgrenzung von EZG kann somit auf verschiedenen Ebenen stattfinden. Im Hinblick auf die Untersuchung von SFE war es dahingehend wichtig, eine Betrachtungsskala zu wählen, auf der die Ereignisse ausgelöst werden bzw. die klein genug ist um die Ereignisse zu beobachten (Doswell, 2001). In diesem Sinne wurde für die weitere Analyse die kleinstmögliche, zur Verfügung stehende EZG-Betrachtungsskala, die BEZG, ausgewählt. Die BEZG-Zuordnung zu den EO erfolgte dann lediglich aufgrund der Tatsache,

in welchem der BEZG die Ereigniskoordinate verortet ist. Die Auswahl dieser Betrachtungsebene war zudem sinnvoll, da hierfür bereits EZG-spezifische Kennwerte vorlagen, welche in der späteren Analyse verwendet werden konnten.

Im nächsten Schritt wurden die für die EO und Ereignisdauern relevanten Raster nach dem zugeordneten BEZG ausgeschnitten. Für jedes zugeschnittene Stundenraster wurde ein Mittelwert pro EZG berechnet. Auf diese Weise wurden die mittleren stündlichen Intensitäten der EZG berechnet. Der jeweilige Maximalwert bildete somit die stündliche, maximale, mittlere Niederschlagsintensität im EZG (Max. Mittl. N-Intensität). Um die mittlere stündliche Intensität für das EZG über die gesamte Ereignisdauer (Mittl. N-Intensität) zu erhalten, wurden die zu einem Ereignis zugehörigen mittleren stündlichen Intensitäten noch einmal gemittelt.

Die in der SFE-Analyse betrachteten Ereignisse wurden als „SF ja“ Ereignisse klassifiziert.

4.2.2 Aufbereitung der Gebietsparameter

Ziel: Geodaten für den späteren Vergleich der SF ja/ SF nein EZG aufbereiten (F4)

Berechnung der Gebietsmittel-/Medianwerte für die relevanten BEZG

Da die Betrachtungsskala für die gebietsspezifische Analyse über die BEZG festgelegt war, mussten die, überwiegend in Form von BW-Rastern vorliegenden Geoinformationen auf die relevanten BEZG zugeschnitten werden. Das Shapefile mit den mittleren Fließgeschwindigkeiten bildete dabei die Ausnahme, da dieses bereits in differenzierter Form für die BEZG vorlag. Für alle anderen Raster wurden mithilfe des „Zonale Statistik“ Werkzeugs in ArcMap die Mittelwerte, sowie die Mediane der relevanten EZG-Eigenschaften je BEZG, bestimmt. Diese wurden anschließend tabellarisch zusammengetragen. In der weiteren Analyse sollte sich dabei zeigen, ob die Verwendung des Mittelwertes oder des Medians Unterschiede ergibt bzw. welcher Schätzer bei welchem Parameter womöglich geeigneter bzw. repräsentativer für die Bedingungen im EZG ist.

4.3 Gegenanalyse

4.3.1 Ereignisauswahl

Ziel: Vergangene Niederschlagsereignisse für BW mit ähnlichen Niederschlagscharakteristiken wie die auslösenden SRE der EO identifizieren (F3)

Festlegung der Rahmbedingungen für die Ereignisauswahl

Zur Durchführung der Gegenanalyse wurden richtungsweisend die Ergebnisse aus der vorherigen SFE-Analyse genutzt. Aufgrund der großen Datenmengen und der zeitaufwändigen Datenverarbeitung, wurde die Gegenanalyse lediglich für eine Auswahl von drei Ereignisjahren durchgeführt. Zwei der Jahre waren dabei die Jahre 2008 und 2018, in denen im Betrachtungszeitraum (2005 – 2018) die meisten SFE bekannt waren. Für das dritte Jahr wurde 2013, ein Jahr mit verhältnismäßig wenigen SFE ausgewählt. Es wurde nicht das Jahr 2015 ausgewählt, da hier nicht sicher war, ob die geringeren SF Beobachtungen nicht aufgrund eines methodischen Fehlers (unvollständige Betrachtung des Jahres, da hier die von Herrn Krause zusammengetragenen Ereignisreihe zu Ende ist) hervorgerufen wurden. Auch wurde nicht das Jahr 2009 ausgewählt, da angenommen wurde, dass die Qualität der Radardaten sich in der jüngeren Vergangenheit noch deutlich verbessert hat. Diese Auswahl sollte zeigen, ob sich durch eine systematische Ereignisanalyse der Jahre letztendlich ähnliche Häufigkeitsverhältnisse wie in der Beobachtungszeitreihe ergeben. Oder anders gesagt: Ob in Jahren, in denen viele SFE beobachtet wurden, ebenso verhältnismäßig viele Ereignisse den Grenzwert überschritten haben.

Des Weiteren wurde die Gegenanalyse auf die Sommermonate April bis Oktober beschränkt. Das entspricht den Monaten, in denen in der Beobachtungszeitreihe am häufigsten SF aufgetreten und SRE zudem besonders wahrscheinlich sind (vgl. Kap. 2.1.1).

Im Folgenden wurde auf Basis der Häufigkeitsverteilung der Max. N-Stundensummen der analysierten SFE ein Grenzwert zur Auswahl der neuen Ereignisse festgesetzt. Dieser wurde so ausgewählt, dass die Werte der bekannten SFE großteils über dem Grenzwert lagen. Da SR als direkte Ursache für SF angenommen wurde, floss in die Entscheidung zudem die SR Klassifizierung des DWD mit ein (vgl. Kap.2.1.1). Der Grenzwert (Mindestwert) wurde dahingehend auf 15 mm/h festgelegt. Da die Radarraster N-Stundensummen beinhalten, wurde aus Gründen der Praktikabilität lediglich dieser eine Grenzwert für die Ereignisauswahl verwendet.

Identifizierung der grenzwertüberschreitenden Ereignisse (Rasteranalyse)

Die Radar-Grundlagendaten wurden hinsichtlich der genannten Kriterien (Jahre 2008, 2013, 2018; Monate April – Oktober) ausgewählt und als weitere Analysebasis verwendet. Weitergehend wurden die N-Stundensummen der jeweiligen Stundenraster, die den Grenzwert überschritten mit den zugehörigen Angaben zu Koordinaten und Zeitpunkt extrahiert. Dabei ergab sich eine sehr große Anzahl an „Treffern“, sodass die Notwendigkeit bestand, die Ereignisauswahl weiter einzugrenzen. Zum einen hätte dies über die Hochsetzung des Grenzwertes erfolgen können, jedoch wurde dies nicht als zweckmäßig angesehen. Vielmehr sollte daher eine weitere zeitliche und räumliche Einschränkung stattfinden, um möglichst unabhängige Ereignisse für die weitere Analyse zu erhalten. Im Weiteren wurden daher Ereignisse im Radius vom 10 km mit einer Zeitdifferenz von < 24 h so aussortiert, dass lediglich das Ereignis mit der höchsten Niederschlagsstundensumme für die weitere Analyse beibehalten wurde. Bei dieser Auswahl wurde davon ausgegangen, dass die grundlegende Wahrscheinlichkeit für eine SF mit zunehmendem Niederschlag steigt und im betrachteten räumlichen Umfeld die hohen Stundenwerte eine höhere Relevanz haben. Zeitlich wurde die Einschränkung als sinnvoll betrachtet, da SF verhältnismäßig selten und typischer Weise nicht mehrmals direkt hintereinander am „gleichen Ort“ auftreten. Im letzten Schritt wurden die ausgewählten Ereignisse noch einmal mit den bekannten SFE abgeglichen. Dabei wurden die Gegenanalyseereignisse (GE) im Radius von 10 km um einen bekannten SFE-Ort bei gleichem Ereignistag aussortiert, um Dopplungen mit unterschiedlicher SF-Klassifizierung (SF ja / SF nein) zu vermeiden. Auf diese Weise konnte die Ereignisauswahl auf ein sinnvolles und analysefähiges Maß reduziert werden. Die ausfindig gemachten Ereignisse wurden gemeinsam mit den zugehörigen Koordinaten, Zeitpunkten und N-Stundensummen in einer jeweiligen Ereignistabelle abgelegt. Die in der Gegenanalyse identifizierten Ereignisse wurden für die weitere Analyse als SFNE klassifiziert.

4.3.2 Analyse der Radardaten/ Aufbereitung der Gebietsparameter

Ziel: Niederschlagscharakteristiken von GE identifizieren und Geodaten für den späteren Vergleich der SF ja/ SF nein EZG aufbereiten (F2, F4)

Die aus der Gegenanalyse erhaltenen Ereignistabellen für 2008, 2013, 2018 wurden im Folgenden auf ähnliche Weise analysiert, wie zuvor die SFE-Tabelle. Wie bereits bei der SFE-Analyse, wurde die Analyse der Radardaten (vgl. Kap. 4.2.1.2) gleichermaßen für die neuen Ereignistabellen der Gegenanalyse durchgeführt. Dabei mussten Ereignisse aussortiert werden, deren EZG über die Landesgrenze von BW hinausreichten, da die notwendigen Berech-

nungsgrundlagen hier nicht zur Verfügung standen. Bei Bestimmung der N-Zellengrößen war dabei die „MO“-Findung nicht notwendig, da die Ereignisse in der Gegenanalyse bereits durch die räumliche Auswahl auf den Maximalwert im Radius von 10 km ausgewählt wurden.

4.3.2 Räumliche Analyse

Ziel: Räumliche Verteilungsmuster von Max. N-Stundensummen in BW aufdecken (F3)

Im Rahmen der Gegenanalyse wurde im Weiteren eine räumliche Analyse der Max. N-Stundensummen durchgeführt. Hierfür wurden die Max. N-Stundensummen der identifizierten Ereignisse in fünf verschiedene Intensitätsklassen eingeteilt, über BW geplottet und visuell ausgewertet. Die Klasseneinteilung wurde an die SR-Klassifizierung des DWD angelehnt (vgl. Kap. 2.1.1) Bei der SFE-Analyse wurde die räumliche Analyse nicht durchgeführt, da hier über die manuelle Auswahl der Ereignisse ein zu starker, negativer methodischer Einfluss angenommen wurde. Da die Auswahl der Gegenanalyseereignisse systematisch erfolgte, wurde hier davon ausgegangen, dass diese Fehlerquelle bei dieser Betrachtung keinen Einfluss auf die sich ergebenden Verteilungsmuster hat.

4.4 Vergleich der Ergebnisse aus SFE- und Gegenanalyse

Zusammenführung der Daten

Als neue Analysebasis wurden die Ergebnisvariablen der Radardatenanalyse und die Ergebnisvariablen der aufbereiteten Gebietsparameter, für die Ereignisse der SFE-Analyse (SF ja) sowie der Gegenanalyse (SF nein) zusammengeführt.

Auswahl der Analysemethoden

Für die Analyse der zu identifizierenden Kausalzusammenhänge standen potenziell verschiedene, statistische Strukturen-prüfende Verfahren zur Auswahl. Primäres Ziel dieser Verfahren ist es, Zusammenhänge zwischen Variablen zu prüfen. Dabei wird die kausale Abhängigkeit einer interessierenden, abhängigen Variable (bspw. SF-Auftreten) von einer oder mehreren unabhängigen Variablen (Einflussvariablen) betrachtet (Backhaus et al., 2018). In Tab. 4.1 finden sich die gängigsten Verfahren mit den zulässigen Skalenniveaus der abhängigen und unabhängigen Variablen. Auf dieser Grundlage wurden die verwendeten statistischen Verfahren ausgewählt.

Tabelle 4.1: Multivariate Analysemethoden: Strukturen-prüfende Verfahren; verwendete Methoden in schwarz (Backhaus et al., 2018)

		Unabhängige Variable	
		Metrisches Skalenniveau	Nominales Skalenniveau
Abhängige Variable	Metrisches Skalenniveau	<i>Regressionsanalyse</i> <i>Zeitreihenanalyse</i>	<i>Varianzanalyse</i> <i>Regression mit Dummies</i>
	Nominales Skalenniveau	<i>Diskriminanzanalyse</i> <i>Logistische Regression</i>	<i>Kontingenzanalyse</i> <i>Auswahlbasierte Conjoint-Analyse</i>

4.4.1 Varianzanalyse

Ziel: Signifikante Gruppenunterschiede für SF ja/ SF nein identifizieren (F4, UH1)

Zur Identifizierung signifikanter Gruppenunterschiede der Einflussvariablen, wurde eine Varianzanalyse (ANOVA) durchgeführt (vgl. Tab. 4.1). Mithilfe dieser wurde untersucht, inwiefern die metrischen Variablen der Datentabelle in Abhängigkeit zu der nominal skalierten Variablen (SF-Auftreten) stehen. Die abhängigen Variablen, die nicht metrisch skaliert vorlagen, wurden über einen Vergleich der Häufigkeitsverteilungen deskriptiv ausgewertet. Zunächst wurden die metrischen Daten auf die Anwendungsbedingungen der ANOVA (Varianzhomogenität + Normalverteilung der Residuen) geprüft. Ob die Residuen der Daten normalverteilt vorlagen, wurde mithilfe von Normal-Quantil-Plots, sowie dem Anderson-Darling goodness of fit-Test, be-

stimmt. Die Varianzhomogenität wurde mittels eines F-Tests geprüft (Dormann, 2017). Das Signifikanzniveau wurde auf 0,05 (95% Konfidenzintervall) festgelegt. Für die betrachteten Variablen, für die die Grundbedingungen der ANOVA nicht erfüllt wurden, wurde anstelle der ANOVA der Kruskal-Wallis-Test als nicht-parametrische Variante der ANOVA angewendet. Bei diesem Test werden die Daten zunächst rang-transformiert und anschließend mithilfe der herkömmlichen ANOVA analysiert (Dormann, 2017).

Da bei den bekannten SFE viele der analysierten Niederschlagskennwerte (bspw. Ereignissummen, Max. N-Stundensummen) sehr gering ausfielen und nicht annähernd die Grenzwerte für SR erreichten, sollten die Niederschlagskennwerte für die beiden Gruppen noch einmal auf anderer Basis verglichen werden. Um die Gruppencharakteristiken vergleichbarer zu machen, wurden auch bei den bekannten SFE diesmal lediglich die SFE betrachtet, welche den Gegenanalysegrenzwert von 15 mm/h überschritten. Die Varianzanalyse wurde anschließend noch einmal für die Niederschlagsparameter auf Basis dieser Ereignisbeschränkung durchgeführt.

4.4.2 Logistische Regression

Ziel: Ausschlaggebende Variableneinflüsse identifizieren und SF Auftreten anhand charakteristischer Variablenzusammenhänge über Auftretens-Wahrscheinlichkeiten erklären (F4, UH2, UH3)

Auswahl der Methode

Im Hinblick auf die weitere Analyse, schränkte die nominale Skalierung der abhängigen Variablen (SF-Auftreten), die potenziell nutzbaren Analysemethoden grundlegend ein (vgl. Tab. 4.1). Da die zu testenden, unabhängigen Variablen darüber hinaus nicht ausschließlich metrisch skaliert waren, wurde eine LR einer Diskriminanzanalyse vorgezogen. Bei einer LR sind sowohl metrische als auch nominal skalierte Daten als unabhängige Variable zulässig, bei einer Diskriminanzanalyse lediglich metrische (Backhaus et al., 2018). Dahingehend wurde ähnlich, wie bei Diakakis et al. (2016) und Youssef et al. (2016) zur Identifizierung der SF relevanten Einflüsse eine binäre LR durchgeführt.

Methodengrundlagen

Konkret ermöglicht es eine LR, die Wahrscheinlichkeit der Zugehörigkeit zu einer Gruppe (hier SF ja / SF nein) in Abhängigkeit von einer oder mehreren unabhängigen Variablen (Einflussvariablen), zu bestimmen (Backhaus et al., 2018). LR werden auch häufig zur Klassifikation verwendet, um verschiedene Beobachtungen den richtigen Klassen zuzuordnen (Sauer, 2019).

In einer binären LR ist die abhängige Variable über folgende Funktion mit den unabhängigen Variablen verbunden (Diakakis et al., 2016; Sauer, 2019) :

$$Y = \ln \left(\frac{p}{1-p} \right) = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_n x_n \quad (2)$$

Y = abhängige Variable

p = Eintrittswahrscheinlichkeit

$p/(1-p)$ = Odds bzw. Chancen (Eintrittswahrscheinlichkeit/ Gegenwahrscheinlichkeit)

$\ln \left(\frac{p}{1-p} \right)$ = Logit (Logarithmus der Odds bzw. Chancen)

b_0 = Konstante der Gleichung (y-Achsenabschnitt)

$b_1, b_2, \dots, b_n$ = Regressionskoeffizienten, welche die relative Wirkung der unabhängigen Variable ($x_1, x_2, \dots, x_n$) auf das Ergebnis (Y -Wert) anzeigen

Die Regressionskoeffizienten einer LR können dabei nicht wie bei einer „normalen“ (linearen) Regression interpretiert werden. Die Werte werden als sogenannte Logits ausgegeben (= transformierte Werte). Die Logits stellen dabei die Logarithmen der Odds dar (vgl. Formel 2). Zwecks Auswertung, müssen die Logits daher delogarithmiert werden um „normale“ Wahrscheinlichkeiten zu erhalten. (Sauer, 2019).

Vorbereitungen zur Durchführung der LR

Die Datentabelle wurde auf für die LR unzulässigen Fehlwerte (NA-Werte) untersucht. Die bei den N-Flächenmittelabnahmen gesetzten NA-Werte mussten dahingehend ersetzt werden. Hierfür wurde der jeweilige Median der Variable und Gruppe (SF ja /nein) verwendet.

Im Vorfeld der Anwendung der LR, wurden die Einflussvariablen einer Korrelationsanalyse nach Spearman, für nicht-parametrische Daten, unterzogen (Dormann, 2017). Um Probleme der Multikollinearität zu vermeiden, wurden möglichst unabhängige Eingangsvariablen für die LR ausgewählt (Sauer, 2019). Auch wurde die zuvor identifizierte Signifikanz der Gruppenunterschiede berücksichtigt. Der Datensatz wurde dahingehend beschränkt und im Weiteren nach dem Zufallsprinzip in zwei Teile geteilt. Es wurde darauf geachtet, dass die Variablenausprägung SF ja/ SF nein in beiden Datensätzen hinreichend vertreten waren. Der überwiegende Teil (TRAIN) des Datensatzes (70%) sollte für das Training des Modells verwendet werden, der andere Teil (TEST; 30 %) für die Validierung (Youssef et al., 2016).

Durchführung der LR (Eintrittswahrscheinlichkeit/ Klassifizierung)

Im Folgenden wurde die LR für den TRAIN-Datensatz durchgeführt und das Modell „aufgesetzt“. Die abhängige Variable bildete dabei das Auftreten von SF (Ja bzw. 1 / nein bzw. 0), als unabhängige Variablen gingen die ausgewählten Einflussvariablen mit ein. Es ergaben sich die grundlegenden Modellhypothesen:

H0: Variable hat keinen Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit, dass ein SFE Auftritt

H1: Variable hat einen Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit, dass ein SFE Auftritt

Auf Basis der LR-Ergebnisse konnten mehr oder weniger starke Variableneinflüsse identifiziert werden. Um ein möglichst einfaches und aussagekräftiges Modell zu erhalten, wurden nicht signifikante Variablen wieder aus der LR herausgenommen. Nachfolgend wurde getestet, inwiefern das Modell durch die Hinzunahme von alternativen Eingangsparametern weiter verbessert werden konnte. Die potenziellen Variablen wurden einzeln hinzugenommen und der Variableneinfluss auf die SF-Eintrittswahrscheinlichkeit getestet. Letztendlich wurde für die LR die Kombination von Eingangsparametern verwendet, welche das einfachste Modell mit der höchsten Modellgüte lieferte.

Die LR ergab für jeden betrachteten Fall die Wahrscheinlichkeit, mit welcher die unabhängige Variable dem Ereignis 1 (hier SF ja) zugeordnet werden kann. Hier musste ein Schwellenwert festgelegt werden, ab welcher Wahrscheinlichkeit der Fall als Ereignis 1 klassifiziert wird. Der bestmögliche Klassifikations-Schwellenwert wurde mithilfe des Youden-Indexes identifiziert. Der Youden-Index wurde wie folgt berechnet (Fluss et al., 2005; Sauer, 2019):

$$\text{Richtig-Positiv-Rate (Sensitivität)} + \text{Richtig-Negativ-Rate (Spezifität)} - 1 \quad (3)$$

Bewertung der Modellergebnisse

Die Klassifikationsgüte des Modells wurde anhand einer Konfusionsmatrix, sowie den hier geläufigen Klassifikationswerten (Spezifität, Sensitivität), bewertet (Sauer, 2019). Auch wurde die Trefferquote bzw. Gesamtgenauigkeit des Modells bestimmt (Backhaus et al., 2018). Zur Identifizierung der Effektstärke wurden die Pseudo- R^2 Maße nach Nagelkerke, Mc Fadden sowie Cox and Snell betrachtet (Diakakis et al., 2016; Youssef et al., 2016). Abweichend zum üblichen Bestimmtheitsmaß R^2 , wird die Modellgüte hier auf Basis des Verhältnisses von zwei Wahrscheinlichkeiten (Likelihood des 0-Modells und der des betrachteten Modells), evaluiert (Backhaus et al., 2018).

Anwendung des LR-Modells

Im Anschluss wurde das LR-Modell auf den TEST-Datensatz angewendet und die Vorhersagefähigkeit getestet. Als Klassifizierungs-Schwellenwert wurde derselbe Wert wie zuvor beim TRAIN-Datensatz verwendet. Gleichermaßen wurden die Modellergebnisse anhand einer Klassifikationstabelle ausgewertet, die Kennwerte der Effektstärken berechnet und die Ergebnisse gegen die, des TRAIN-Datensatzes, verglichen. Weitergehend wurden die Ereignisse über die ROC-Kurve (Receiver Operating Characteristic) betrachtet. Als Gütemaß der Prognose- oder Klassifizierungsfähigkeit des Modells, wurde hier die Fläche unter der ROC-Kurve (AUC, Area Under the Curve) ausgewertet (Sauer, 2019; Youssef et al., 2016).

5. Ergebnisse

5.2 Grundlagendaten

Über die durchgeführte Online-Recherche zu vergangenen SFE konnte die Ereignistabelle von Herrn Krause um 60 neue SFE im Zeitraum von 2014 – 2018 (überwiegend 2016 -2018) erweitert bzw. aktualisiert werden. Unter dem Suchbegriff SR konnten dabei deutlich mehr bekannte SFE identifiziert werden als über den Begriff SF selbst. Insgesamt beinhaltet die SFE-Tabelle somit Daten zu 359 vergangenen Ereignissen im Zeitraum von 1980 – 2018 mit den zugehörigen Angaben zum Ereignisdatum und Schadensort.

Für die Radardatenanalyse der bekannten SFE (2005 – 2018) wurden 8088 relevante Grundlagenraster heruntergeladen und ausgewertet. Die Gegenanalyse fand auf Basis von 15400 Grundlagenrastern (2008, 2013, 2018) statt.

5.3. SFE-Analyse

5.3.1 Analyse der Ereignisdaten

Die zeitliche Analyse der Ereignisse aus der SFE-Tabelle zeigt, dass zu Beginn der Zeitreihe (1980 – 2001) in BW verhältnismäßig wenig SFE beobachtet wurden (Abb. 5.1). Im Zeitraum von 1980 bis 1998 ergeben sich zudem Zeitreihenlücken durch Jahre in denen keinerlei SFE beobachtet wurden (11 Jahre). Ab 2002 nehmen die jährlich beobachteten SFE deutlich zu. Dabei ergeben sich Jahre mit sehr vielen bekannten SF wie bspw. 2006, 2008 und 2018, aber auch Jahre mit geringeren Häufigkeiten wie 2005, 2009, 2017. Im Verlauf der Zeitreihe zeigt sich eine unregelmäßige aber dennoch tendenzielle Zunahme der beobachteten SFE (Abb. 5.1).

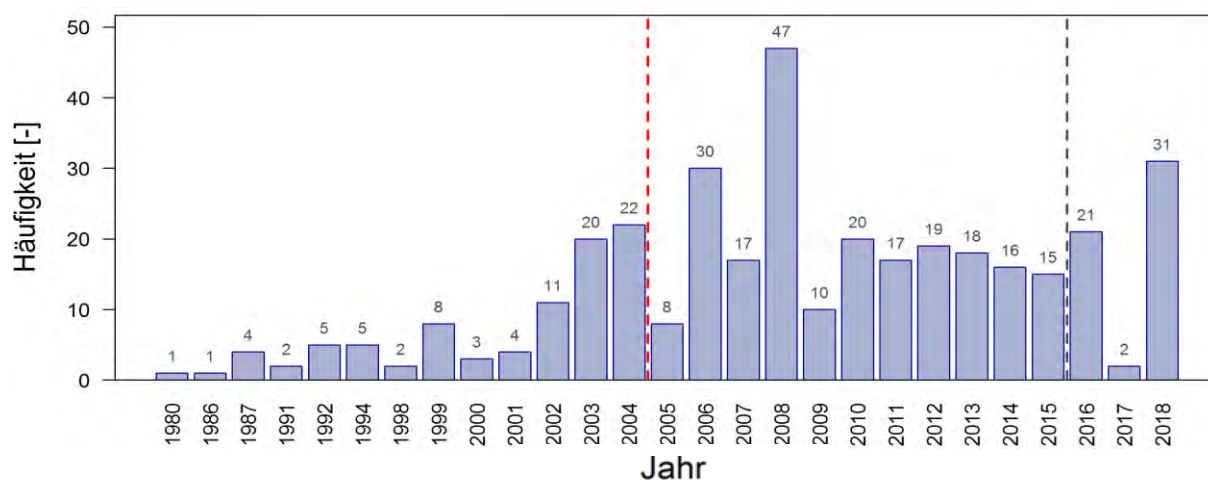


Abbildung 5.1: Bekannte SFE (1980 - 2018) nach Jahren (Jahre ohne SFE nicht dargestellt), Trennlinie (grau): Ende der Beobachtungszeitreihe von Herrn Krause, Trennlinie (rot): Beginn Radardatenverfügbarkeit

Bei Betrachtung des jahreszeitlichen Auftretens der SFE zeigt sich eine deutliche Saisonalität (Abb. 5.2). Verstärkt sind SF in den Monaten des hydrologischen Sommerhalbjahrs (+ April) aufgetreten. Ein klarer Schwerpunkt liegt dabei auf den Monaten Mai bis Juli, hier sind mit Abstand die meisten SFE verzeichnet. Für die Monate November bis März wurden dahingehend kaum SF beobachtet. Für den Monat November sind keine SFE bekannt.

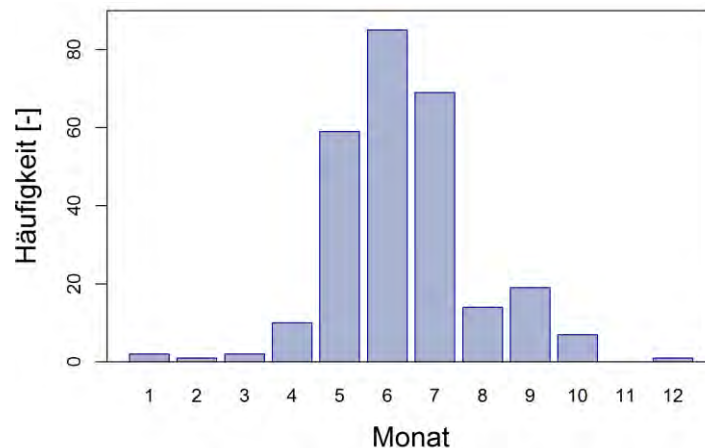
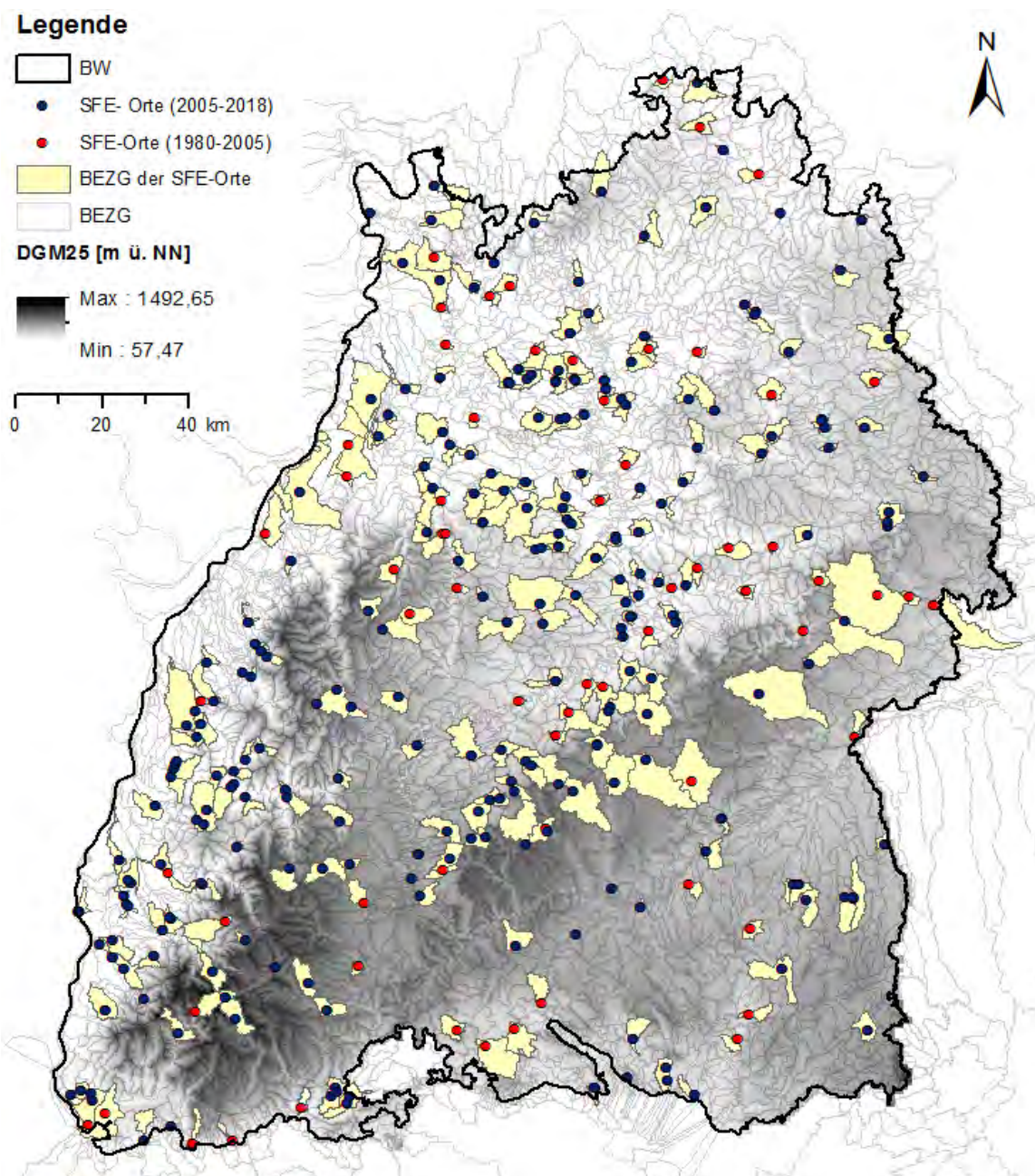


Abbildung 5.2: Häufigkeit der bekannten SFE (1980 – 2018) nach Monaten (Januar – Dezember)

Im Hinblick auf räumliche Muster im Auftreten bekannter SF, lässt sich grundlegend feststellen, dass SF in der Vergangenheit über ganz BW verteilt aufgetreten sind (Karte 5.1). Dennoch zeigen sich gewisse Tendenzen. Gehäuft sind SF dabei in der Gegend des Schwarzwaldes sowie im westlichen Teil der Schwäbischen Alb aufgetreten. Ebenso in den Regionen um Stuttgart, Heilbronn, Pforzheim und Offenburg sind vermehrt SFE beobachtet worden. Im Osten von BW (bspw. Bauland, Hohenloher Ebene, Oberschwaben, Allgäu) treten hingegen stärker vereinzelte SF auf. Mancherorts zeigen sich auch sehr lokale Häufungen, wie bspw. an der südlichen Grenze zu Frankreich bzw. Schweiz im Raum Lörrach oder Klettgau. Das Zentrum sowie der Nordwesten von BW sind in der Vergangenheit somit tendenziell stärker von SF betroffen gewesen als der Osten (Karte 5.1). Berücksichtigt man bei der Betrachtung zudem die zeitliche Trennung, weisen die Ereignisse bis 2005 grundlegend ein deutlich vereinzelteres Auftreten über ganz BW auf. Die Ereignisse nach 2005 liegen dabei stärker in Clustern vor.



Karte 5.1: Bekannte SFE-Orte in BW (Zeitraum: 1980 – 2018, Anzahl: 359) und deren zugehörige BEZG

5.3.2 Analyse der Radardaten

Im Rahmen der Radardatenanalyse wurden lediglich 269 der 359 Ereignisse aus der SFE-Tabelle näher analysiert. Neunzig Ereignisse (SFE vor Juni 2005) mussten ausgeschlossen werden, da für deren Ereignisjahre das RW-Produkt nicht zur Verfügung stand (vgl. Karte 5.1).

Niederschlagskennwerte EO

Die Untersuchung des tageszeitlichen Auftretens von SF-bildungsrelevanten SR zeigt, dass die relevanten Ereignisse grundlegend zu jeder *Tageszeit* auftreten können. Ein verstärktes Auftre-

ten ergibt sich dennoch in der zweiten Tageshälfte (12:50 – 23:50 Uhr). Der Anfangszeitpunkt der wenigsten SRE liegt dabei in den Morgenstunden (Abb. 5.3). Die Ergebnisse für EO und MO deckten sich hier fast gänzlich, sodass lediglich Abb. 5.3 zu den EO dargestellt ist.

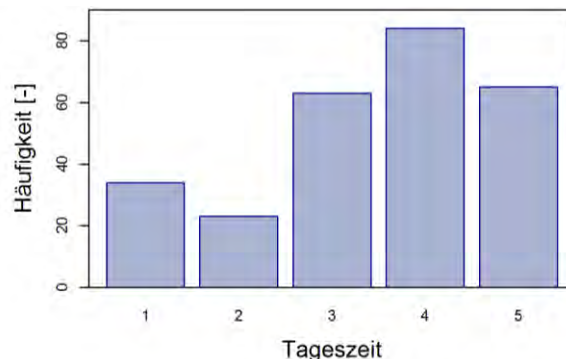


Abbildung 5.3: Häufigkeiten der SF auslösenden SRE nach Tageszeitenklassen am EO: Früher Morgen (1), Morgen (2), Mittag (3), Abend (4) und Nacht (5) (vgl. Kap. 4.2.1.2)

Bei der zeitlichen Abgrenzung der Niederschlagsereignisse im Hinblick auf die *Ereignisdauern* für EO sowie MO hat sich des Weiteren gezeigt, dass bei zunehmender Ereignisdauer die Häufigkeit der SFE zunimmt. Die Betrachtung der EO und MO ergeben hier wiederum sehr ähnliche Häufigkeitsverhältnisse (Abb. 5.4a/b). Die Dauerstufen von 1 h und 6 h grenzen sich in ihrer Häufigkeit dabei verhältnismäßig deutlich von den anderen Dauerstufen ab. Die Ereignisdauern mit 2 h oder 3 h bzw. 4 h oder 5 h weisen sehr ähnliche Häufigkeiten auf.

Bei Betrachtung der *Ereignissummen* für die analysierten EO-Ereignisse zeigen sich Werte zwischen 0 - 141,2 mm (Abb. 5.4c). Der Median der Ereignissummen liegt dabei bei 31,5 mm. Die mit Abstand höchsten Häufigkeiten sind in der Klasse von 20 – 30 mm zu beobachten. Auch sind die Klassen mit Ereignissummen < 20 mm verhältnismäßig stark vertreten. Bei den MO ergeben sich Werte in einem Wertebereich von 0 – 185,1 mm (Abb. 5.4d). Der Median liegt hier mit 45,1 mm über dem Median der EO. Am häufigsten treten hier Ereignisse der Klasse von 30 - 40 mm auf. Deutlich weniger häufig als an den EO sind Ereignissummen von < 20 mm vertreten. Die Häufigkeitsverteilung der MO ist im Vergleich zu der an den EO etwas rechtsseitig verschoben und weist tendenziell mehr Ausreißer auf. Der Maximalwert an den MO ist dementsprechend höher, sowie auch das allgemeine Niveau der Ereignissummen. Ausgehend vom Häufigkeitsmaximum sind für beide Verteilungen fast ausschließlich abnehmende SF-Häufigkeiten mit zunehmender Niederschlagssumme festzustellen. Über einem Grenzwert von ca. 100 (EO) bzw. 110 (MO) mm weisen beide Verteilungen lediglich vereinzelt höhere Werte auf. Für EO wie MO zeigen sich rechtsschiefe Häufigkeitsverteilungen mit klarem Peak.

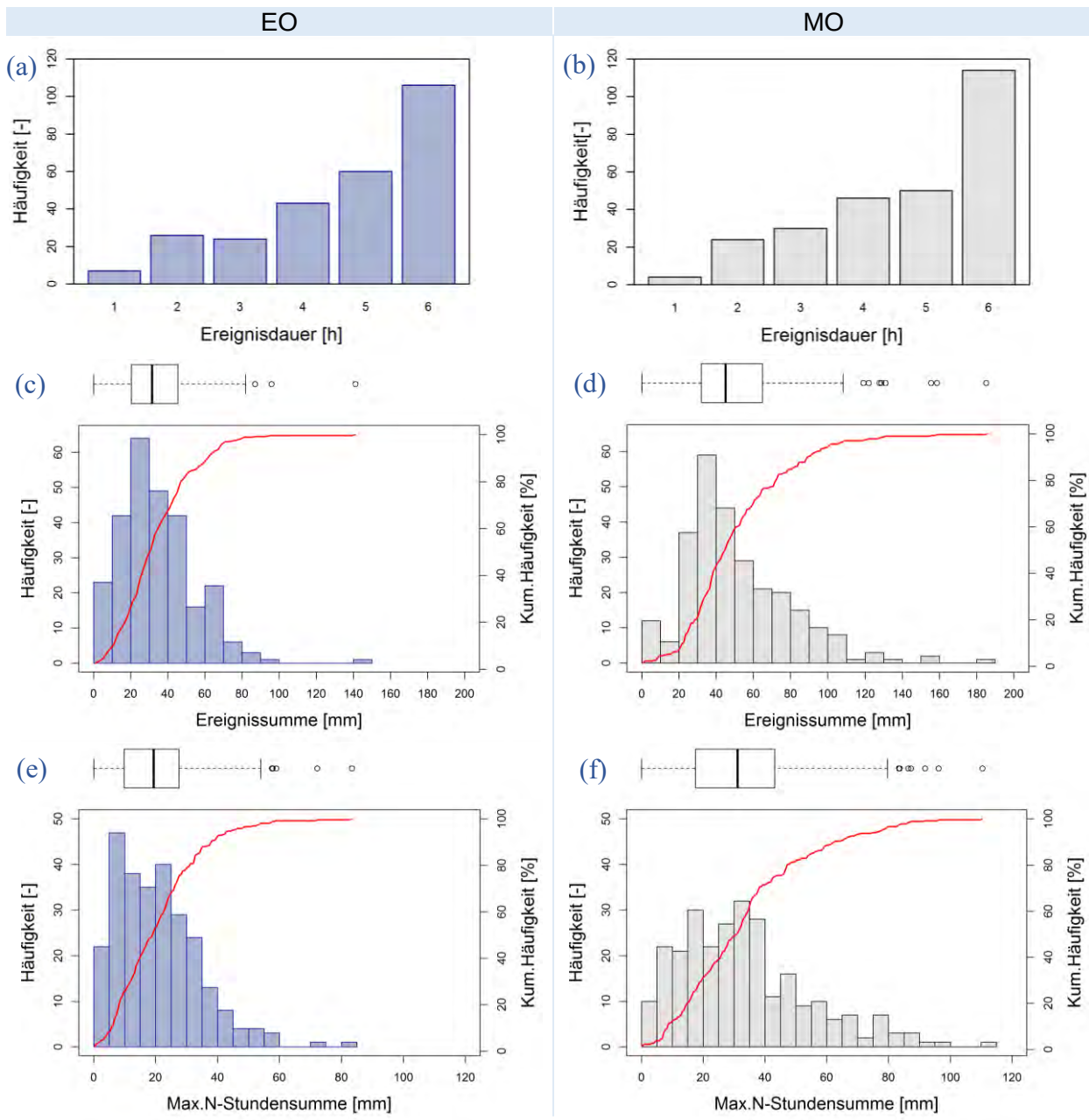


Abbildung 5.4: Ergebnisse der Niederschlagskennwerte für Ereignisdauer, Ereignissumme, Max. N-Stundensumme für EO und MO im Vergleich

Für die *Max. N-Stundensummen* an den EO ergeben sich Werte von 0 - 83,4 mm mit einem Median von 19,4 mm (Abb. 5.4e). Überwiegend bewegen sich die Max. N-Stundensummen der Ereignisse dabei zwischen 0 – 60 mm. Höhere Werte treten lediglich vereinzelt auf. Die größten Häufigkeiten finden sich in der Klasse von 5 – 10 mm. Ausgehend von diesem Maximum nehmen die Häufigkeiten fast uneingeschränkt mit zunehmender Max. N-Stundensumme ab. Die MO weisen hingegen eine deutlich breitere Häufigkeitsverteilung als die EO auf (Abb. 5.4f). Die kumulierte Häufigkeitskurve zeigt dahingehend einen wesentlich flacheren Anstieg. Die Werte verteilen sich hier zwischen 0 - 110,4 mm. Der Median liegt bei einer Max.

N-Stundensumme von 31,1 mm und ist somit um ca. 1/3 höher als an den EO. Im Vergleich weisen die Ereignisse an den MO somit deutlich häufiger höhere Max. N-Stundensummen auf und zeigen ebenso wieder mehr Ausreißer. Die Klassen mit sehr geringen Max. N-Stundensummen sind ebenso wieder deutlich schwächer vertreten als bei den EO. Dennoch zeigen sich Gemeinsamkeiten; so liegt der Großteil der Ereignisse der Verteilungen zwischen 0 – 35 mm (EO) bzw. 5 – 40 mm (MO). Die Spannweite des Verteilungsschwerpunktes ist somit gleich und bei den MO lediglich um eine Klasse nach rechts verschoben.

Zwischen den Ereignissummen und den Max. N-Stundensummen der Ereignisse an EO sowie MO besteht ein klarer positiver Zusammenhang. Bei Ereignissummen bis zu ca. 40 mm machen die Max. N-Stundensummen häufig einen verhältnismäßig hohen Anteil (bis zu 100 %) der Ereignissumme aus. Umso höher die Ereignissummen desto seltener zeigt sich dieser Zusammenhang.

Niederschlagskennwerte EZG

Bei Betrachtung der *Mittl. N-Intensität* im EZG über die jeweilige Dauer der Ereignisse ergeben sich Werte zwischen 0 - 47,8 mm/h (Abb. 5.5a). Für den Großteil der Ereignisse sind *Mittl. N-Intensitäten* zwischen 0 – 16 mm/h zu beobachten, höhere Werte sind als Ausreißer klassifiziert. Die mit Abstand häufigsten Ereignisse ergeben sich in der Klasse mit einer *Mittl. N-Intensität* von 4 – 6 mm/h. Der Median der Verteilung liegt bei 6,3 mm/h.

Für die *Max. Mittl. N-Intensitäten* im EZG ergeben sich deutlich höhere Werte als bei den *Mittl. N-Intensitäten* (vgl. Abb. 5.5b). Diese weisen hingegen eine ähnliche Verteilung wie die *Max. N-Stundensummen* der EO auf. Die *Max. Mittl. N-Intensitäten* bewegen sich in einem Wertebereich zwischen 0 - 89,2 mm/h mit einem Median von 17,2 mm/h.

Auch zwischen den *Mittl. N-Intensitäten* und den *Max. Mittl. N-Intensitäten* zeigt sich ein klarer positiver Zusammenhang. Bei verhältnismäßig geringen Intensitäten bis ca. 6 mm/h zeigen sich mitunter noch sehr ähnliche mittlere und maximale EZG-Intensitäten. Umso höher die Intensitäten werden, desto weiter gehen die Niederschlagsraten auseinander (*Max. Mittl. N-Intensitäten* deutlich größer als *Mittl. N-Intensitäten*).

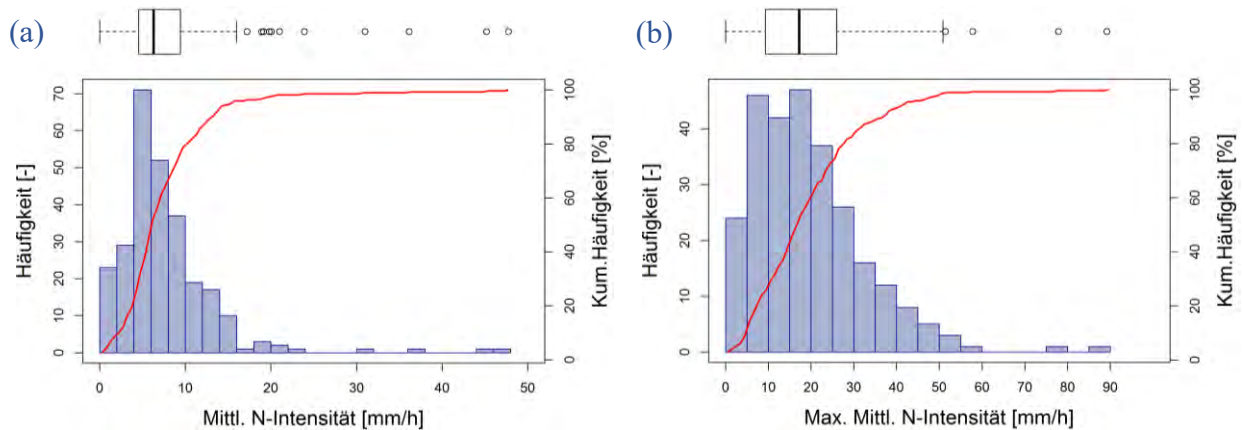


Abbildung 5.5: Mittl. N-Intensität [mm/h] und Max. Mittl. N-Intensität [mm/h] für die EO-Ereignisse

Aufgrund der ähnlichen Verteilungen der Max. Mittl. N-Intensitäten und Max. N-Stundensummen, wird im Weiteren das Verhältnis der beiden Parameter in Abhängigkeit zur EZG-Fläche näher betrachtet. Die Relation der Niederschlagsparameter ist dabei in einem Verhältnisfaktor (= Max. Mittl. N-Intensität/ Max. N-Stundensumme) zusammengefasst und gegen die zugehörigen EZG-Flächen aufgetragen (Abb. 5.6). Grundsätzlich ergeben sich Faktorenwerte zwischen 0,12 – 2,8, mit dem Median bei 0.97. Die Ereignispunkte verteilen sich dementsprechend gleichermaßen über wie unter der 1:1 Linie. Viele der Punkte verorten sich dabei in direkter Nähe zur 1:1 Linie. Dennoch weisen einige Ereignisse auch deutlich unausgeglichene Verhältnisse auf, sodass die Vergleichsparameter dementsprechend wesentlich stärker voneinander abweichen. Die Abweichungen von der 1:1 Linie ergeben sich hier in beide Richtungen. Die EZG-Fläche zeigt keinen erkennbaren Einfluss auf den Verhältnisfaktor. Das Verhältnis von Max. Mittl. N-Intensität und Max. N-Stundensumme ist somit überwiegend unabhängig von der EZG-Fläche.

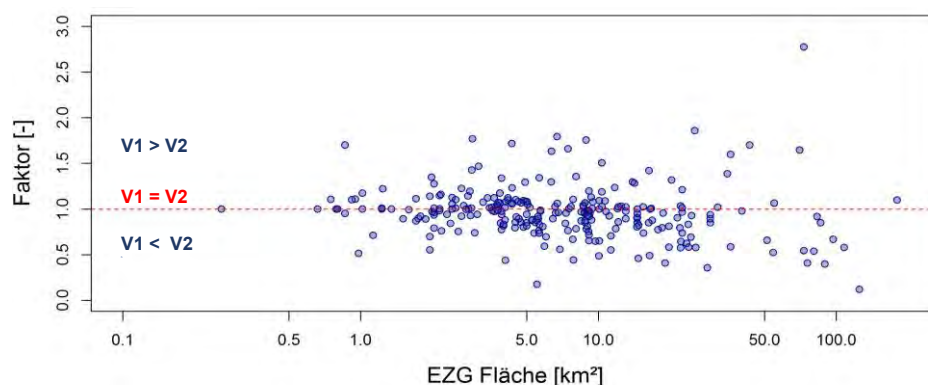


Abbildung 5.6: Verhältnisfaktor von Max. Mittl. N-Intensität [mm/h] ($V1$) und Max. N-Stundensumme [mm/h] ($V2$) nach EZG-Fläche, 1:1 Linie (rot) von Max. Mittl. N-Intensität und Max. N-Stundensumme

Niederschlagszellengröße

Aufgrund fünf nicht signifikanter Zusammenhänge werden in der Auswertung zu den *Niederschlagszellengrößen* lediglich die Ergebnisse für 264 MO betrachtet. Es werden dabei die Zusammenhänge bei nicht logarithmierter Skalierung verwendet. Alle der signifikanten, linearen Zusammenhänge sind negativ. Dementsprechend ergeben sich ausschließlich Abnahmen der mittleren Niederschlagssummen mit zunehmender Entfernung vom MO (Abb. 5.7). Die Abnahmen der mittleren Niederschlagssummen bewegen sich dabei zwischen 11,3 – 27,8 %/km, mit einem Median von 20,4 %/km. Ausgehend vom MO, wird somit theoretisch in einer Entfernung von 3,6 – 8,8 km die „Außengrenze“ der jeweiligen Zelle erreicht. Geht man von kreisförmigen Niederschlagszellen aus, bedeutet das, dass die betrachteten Zellen eine Gesamtausdehnung von etwa 41– 243 km² aufweisen. Für den Median dieser Fälle wird die Zellengrenze in 4,9 km Entfernung vom MO erreicht und besitzt eine Gesamtausdehnung von etwa 75 km².

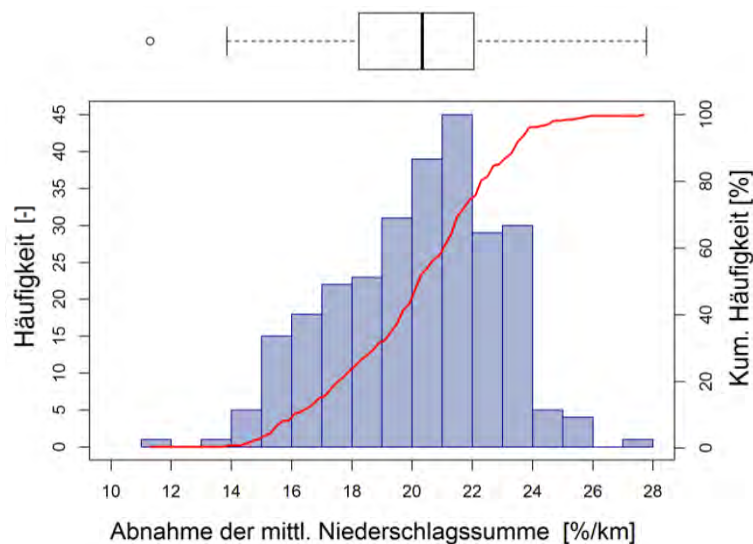


Abbildung 5.7: Abnahme der mittleren Niederschlagssumme [%] mit zunehmender Entfernung [km] vom Ereignisort zum Zeitpunkt der Max. N-Stundensumme des Ereignisses.

5.4 Gegenanalyse

5.4.1 Ereignisauswahl

Im Rahmen der Gegenanalyse wurden insgesamt 147863 Rasterpixel bzw. SRE identifiziert, welche in den betrachteten Jahren 2008, 2013, 2018 den gesetzten Grenzwert von 15 mm/h überschritten haben (Tab. 5.1). 2018 wurde der Grenzwert dabei nahezu flächendeckend überschritten. Für 2008 sowie 2013 zeigten sich hier erste räumliche Muster (Abb. 5.8). Diese wurden aufgrund der späteren räumlichen Analyse an dieser Stelle jedoch nicht weiter betrachtet. Im Zuge der anschließenden räumlichen und zeitlichen Eingrenzung der Ereignisse und der Herausnahme der bekannten SFE-Ereignisse, konnten die Ereignisorte auf ein sinnvolles Maß eingeschränkt werden (Abb. 5.8). Letztendlich wurden 2356 neue, unabhängige SRE für die weitere Analyse mit der Klassifizierung NSFE identifiziert (Tab. 5.1).

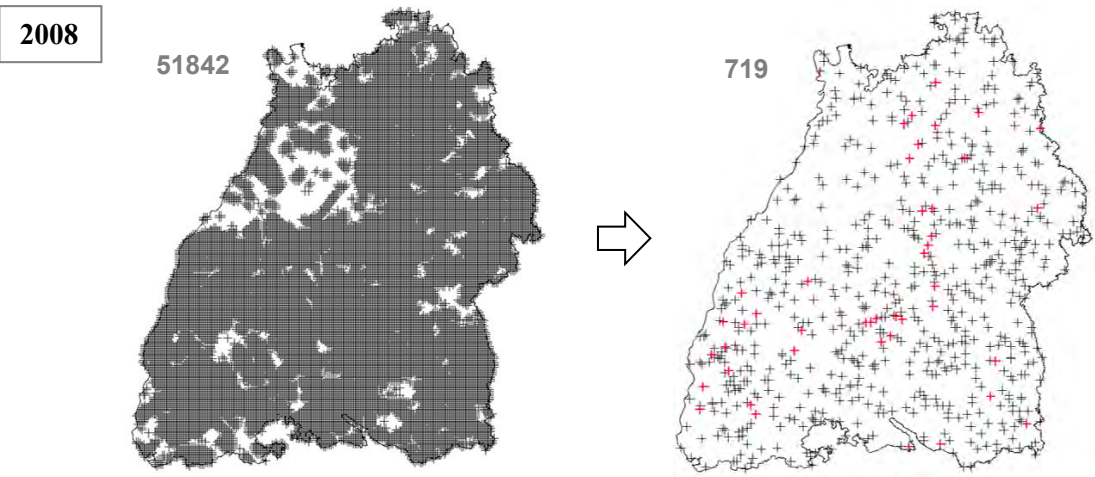


Abbildung 5.8: Eingrenzung der identifizierten Rasterpixel/ Ereignisse in BW über dem Grenzwert 15 mm/h (links) beispielhaft für das Jahr 2008 ; Ergebnis: Unabhängige Ereignisse nach zeitlicher-/örtlicher Eingrenzung (rechts), bekannte SFE-Orte 2008 in Rot

Tabelle 5.1: Ergebnisse der Ereignisauswahl von der Gegenanalyse mit den jeweiligen Anteilen an den Gesamtanzahlen [%] im Vergleich zu den bekannten SFE

Jahr	Pixel über Grenzwert	%	Ereignisauswahl	%	Bekannte SFE	%
2008	51842	35	719	30	47	49
2013	31983	22	558	24	18	19
2018	64038	43	1079	46	31	32
Gesamt	147 863	100	2356	100	96	100

Die systematische Analyse hinsichtlich der grenzwertüberschreitenden Pixel zeigt, dass in den Jahren mit vielen bekannten SFE (2008, 2018) der Grenzwert auch deutlich häufiger überschritten wurde als in dem Jahr (2013) mit weniger beobachteten SFE. Auch sind in dem Jahr mit wenig SF deutlich weniger relevante Ereignisse für die weitergehende Analyse ausgewählt

worden. Die prozentualen Anteile der Pixel über dem Grenzwert und der letztendlich ausgewählten Ereignisse an den Gesamtwerten, unterscheiden sich hier nur geringfügig. Im Vergleich zu den prozentualen Werten der bekannten SFE ergeben sich dabei abweichende Anteile. Klar zeigt sich des Weiteren, dass die absoluten Zahlen der systematisch identifizierten SRE um ein Vielfaches höher liegen als die der real bekannten SFE. Im Schnitt sind es für die drei Beobachtungsjahre lediglich ca. 4 % der Gesamtereignisse (Ereignisauswahl sowie bekannte SFE (da zuvor herausgenommen)), welche in Realität zu bekannten SFE geführt haben.

5.4.2 Analyse der Radardaten

Für die Radardatenanalyse sowie für alle weiteren Analysen wurden 16 der GE aussortiert, da deren BEZG sich außerhalb von BW verorteten. Die weiteren Analysen beruhen dementsprechend auf der Grundlage von 2340 GE. Die Untersuchung zu den N-Zellengrößen ergab 71 nicht signifikante Zusammenhänge im Jahr 2008, 36 nicht signifikante Zusammenhänge 2013 und 18 nicht signifikante Zusammenhänge 2018. Die eigentlichen Analyseergebnisse sind in Kap. 5.5 ausführlich im Vergleich zu den Ergebnissen der EO dargestellt.

5.4.2 Räumliche Analyse

Betrachtet man die räumliche Analyse der klassifizierten Max. N-Stundensummen grundlegend, mit Blick auf die SR Einordnung des DWD, zeigen sich am häufigsten Ereignisse der Stufen SR und heftiger SR (Abb. 5.9). Extrem heftige SR treten dennoch nicht selten auf, sondern sind in allen Betrachtungsjahren deutlich vertreten. Das Jahr 2018 weist dabei prinzipiell die häufigsten Ereignisse dieser Kategorie auf, jedoch finden sich Ereignisse der höchsten Intensitätsklasse lediglich in den Jahren 2008 und 2013. Im Jahr 2018 ist dafür die Intensitätsklasse von 70 bis < 100 mm/h verhältnismäßig stark vertreten. Im Hinblick auf charakteristische Verteilungsmuster, zeigen sich in verschiedenen Jahren unterschiedliche Tendenzen. 2008 sind im Kraichgau dahingehend wenig SRE aufgetreten, welche überwiegend der kleinsten SR-Kategorie zuzuordnen sind. 2018 hingegen sind in diesem Gebiet deutlich mehr SRE aufgetreten, welche sich zudem in höhere SR-Kategorien einordnen. Geringe SRE-Dichten zeigen sich zudem 2013 im Nord- und Südosten von BW. Für 2008 wie 2018 erweist sich dieses Muster nicht als charakteristisch. Allgemeingültig für die betrachteten Jahre lässt sich jedoch feststellen, dass dort, wo geringe Ereignisdichten zu beobachten sind, die Ereignisse tendenziell den niedrigen Intensitätsklassen zuzuordnen sind. Bei extrem heftigem SR zeigen sich hingegen gegensätzliche Tendenzen; so verorten sich diese 2008 stärker in der Südosthälfte, 2013 eher im Zentrum von BW und 2018 schwerpunktmäßig im Bereich des Schwarzwaldes. Ereignisse,

die sich den zwei höchsten Intensitätsklassen zuordnen, zeigen neben einem sehr vereinzelt Auftreten in 2008 und 2013, lediglich im Jahr 2018 eine südliche Tendenz in ihrem Auftreten.

Betrachtet man die Jahre hingegen nicht differenziert voneinander, sondern in ihrer Gesamtheit, wird erkenntlich, dass SRE der Klassen bis < 70 mm/h im gegebenen Beobachtungszeitraum nahezu landesweit aufgetreten sind. Ein gewisser Schwerpunkt zeigt sich hier jedoch im südlichen Teil von BW (ausgenommen Voralpenland), wo zudem auch die noch extremen Ereignisse gehäuft anzutreffen sind.

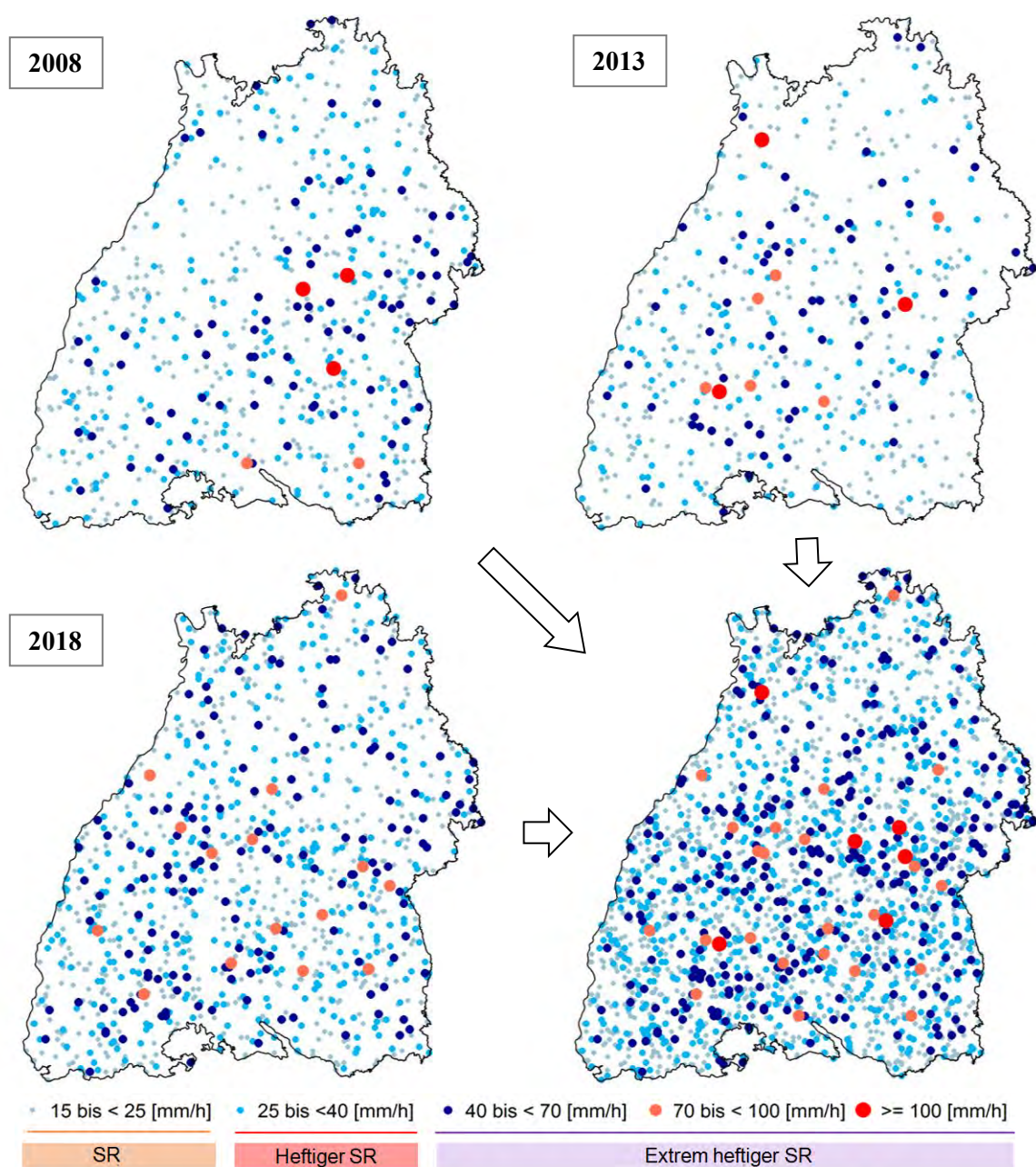


Abbildung 5.9: Darstellung der Max. N-Stundensummen [mm/h] der GE nach Intensitätsklassen für 2008, 2013, 2018 sowie im Gesamtüberblick (unten rechts). DWD SR-Klassifizierung im Vergleich (vgl. Kap. 2.2.1/3)

5.5 Vergleich der Ergebnisse aus SFE- und Gegenanalyse

5.5.1 Varianzanalyse

Die für die Varianzanalyse ausgewählten Parameter sind in Tab. 5.2 zusammengefasst. Für alle diese Parameter wurde der Kruskal-Wallis-Test durchgeführt, da die Grundannahmen für eine klassische ANOVA nicht erfüllt wurden. Die Parameter des monatlichen sowie tageszeitlichen Auftretens der SFE bzw. NSFE, mussten aufgrund ihrer nicht metrischen Skalierung von der Varianzanalyse ausgeschlossen werden. Sie werden im Anschluss näher ausgewertet.

Zunächst findet die Betrachtung der Varianzanalyseergebnisse hinsichtlich der *Niederschlagsparameter* auf Basis des vollständigen Datensatzes statt. Alle untersuchten Niederschlagsparameter, bis auf die Ereignissumme, weisen hier signifikante Gruppenunterschiede ($p\text{-Wert} < 0,05$) für SFE und NSFE auf (Abb. 5.10, Tab. 5.2). Die Mediane der Gruppen liegen dabei meist verhältnismäßig nah beieinander. Am stärksten signifikant sind die Gruppenunterschiede der Parameter N-Flächenmittelabnahme und Max. N-Stundensumme (Abb. 5.10c/f). Hier zeigen sich für die SFE signifikant geringere Max. N-Stundensummen, sowie schwächere relative Flächenmittelabnahmen. Stark signifikant sind ebenso die Gruppenunterschiede der Parameter Ereignisdauer und Mittl. N-Intensität. Ein weniger signifikanter Gruppenunterschied ergibt sich dabei bei der Max. Mittl. N-Intensität (Abb. 5.10e/d). Im Verhältnis weisen die SFE meist etwas längere Ereignisdauern auf mit vergleichsweise höheren Mittl./ Max. Mittl. N-Intensitäten. An SFE-Orten wie NSFE-Orten treten dabei im Schnitt sehr ähnliche Ereignissummen auf. Die Spannweiten der Werte, über die sich die NSFE erstrecken, sind dabei meist deutlich weiter als die der SFE. Zudem zeigen sich bei den NSFE wesentlich mehr Ausreißer.

Für den zweiten Varianzanalysendurchlauf der Niederschlagsparameter mussten 107 SFE unter dem Grenzwert (Max. N-Stundensumme < 15 mm) aussortiert werden. Die Gruppenvergleiche wurden dementsprechend nochmals auf Basis der 162 grenzwertüberschreitenden SFE und den NSFE (alle beibehalten) durchgeführt. Die Analyseergebnisse weichen dabei von denen der vorherigen Analyse ab. Für alle Parameter, bis auf die Max. N-Stundensummen, ergeben sich hoch signifikante Gruppenunterschiede (vgl. Tab. 5.2). Die Ereignissummen, die Mittl. N-Intensitäten sowie die Max. Mittl. N-Intensitäten der SFE, liegen dabei signifikant über denen der NSFE. Die Mediane dieser Parameter weisen entsprechend höhere Differenzen zu den Medianen der NSFE auf als zuvor. Die relativen Flächenmittelabnahmen zeigen als einzige keine deutliche Veränderung zu den zuvor identifizierten Verhältnissen.

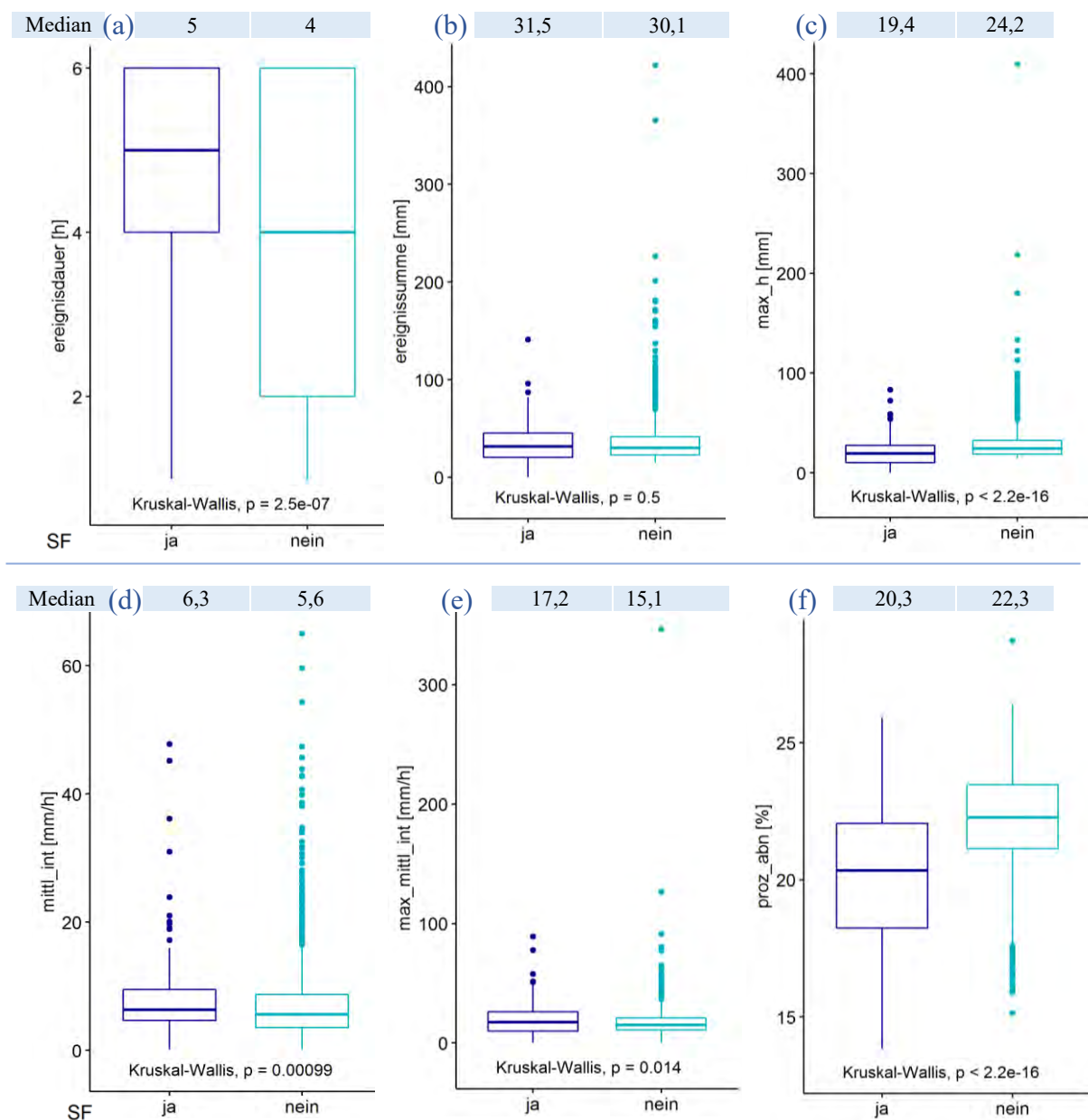
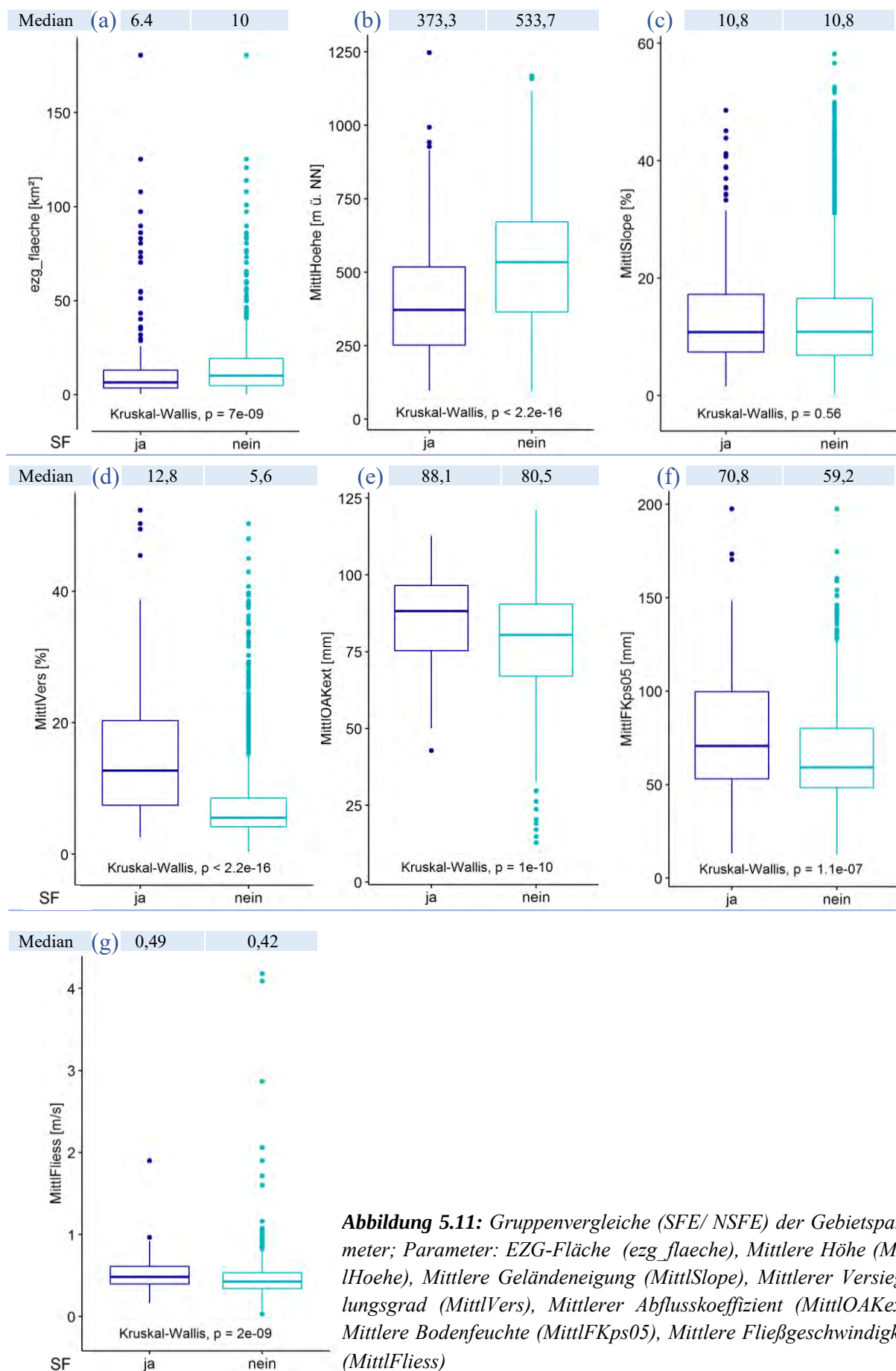


Abbildung 5.10: Gruppenvergleich (SFN/ NSFN) der Niederschlagsparameter auf Basis des Gesamtdatensatzes; Parameter: Ereignisdauer (ereignisdauer), Ereignissumme (ereignissumme), Max. N-Stundensumme (max_h), Mittl. N-Intensität (mittl_int), Max. Mittl. N-Intensität (max_mittl_int), N-Flächenmittelabnahme (proz_abn).

Für die Analyse der Gruppenunterschiede bei den *Gebietsparametern* hat sich gezeigt, dass die Verwendung des Gebietsmittelwertes oder -medianes für die vorliegenden Daten, keinen relevanten Einfluss auf das Ergebnis der Varianzanalyse hat. Es ergeben sich grundlegend gleichgerichtete Unterschiede mit sehr ähnlicher Signifikanz. Im Folgenden werden daher lediglich die Gebietsmittelwerte weiter im Rahmen der Auswertung betrachtet.

Für die Gebietsparameter lassen sich nahezu ausschließlich signifikante Gruppenunterschiede feststellen. Die Mehrheit der Gruppenunterschiede ist hoch signifikant (Abb. 5.11, Tab. 5.2).



Lediglich bei der mittleren Geländeneigung zeigt sich ein nicht signifikanter p-Wert und dementsprechend kein signifikanter Unterschied (Abb. 5.11c). Für die Parameter mittlerer Versiegelungsgrad, mittlerer Abflusskoeffizient, mittlere Bodenfeuchte sowie mittlere Fließgeschwindigkeit liegen die Werte der SFE im Schnitt signifikant über denen der NSFE (Abb. 5.11d/e/f). Lediglich bei den Parametern der EZG-Fläche und Mittleren Höhe zeigen sich bei den SFE im Schnitt signifikant niedrigere Werte (Abb. 5.11a/b). Die Geländeneigungen der SFE und NSFE EZG sind im Mittel sehr ähnlich.

Bei den Niederschlags- sowie den Gebietsparametern zeigen sich für die Gruppen SFE und NSFE dementsprechend fast durchweg signifikante Unterschiede. In Tab. 5.2 sind diese noch einmal im Überblick dargestellt.

Tabelle 5.2: Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Varianzanalyse zu den Niederschlags- und Gebietsparametern; Signifikanz: $< 2e-16$ (+++); $< 0,001$ (++) ; $< 0,01$ (+); $> 0,05$ (○).

Parameter	Einheit	Median			Signifikanz		
		SFE (gesamt)	SFE (162)	NSFE	SFE (gesamt)/NSFE	SFE(162)/NSFE	
Ereignisdauer	[h]	5	5	4	++	++	Niederschlag
Ereignissumme	[mm]	31,5	42,1	30,1	○	+++	
Max. N-Stundensumme	[mm]	19,4	26,2	24,2	+++	+	
Mittlere N-Intensität	[mm/h]	6,3	8,26	5,6	++	+++	
Max. Mittlere N-Intensität	[mm/h]	17,2	23,9	15,1	+	+++	
N-Flächenmittelabnahme	[%/km]	20,3	20,8	22,3	+++	+++	
EZG- Fläche	[km ²]	6,4	-	10	++	-	EZG- Eigenschaften
Mittlere Höhe	[m ü. NN]	373	-	534	+++	-	
Mittlere Geländeneigung	[%]	10,8	-	10,8	○	-	
Mittlerer Versiegelungsgrad	[%]	12,8	-	5,6	+++	-	
Mittlerer Abflusskoeffizient^{*1}	[mm]	88,1	-	80,5	++	-	
Mittlere Bodenfeuchte^{*2}	[mm]	70,8	-	59,2	++	-	
Mittlere Fließgeschwindigkeit	[m/s]	0,49	-	0,42	++	-	

*1 OAK-Wert bei „Extrem“- Szenario

*2 nFK bei einer Bodenfeuchte, die in 50% aller Tage im hydrologischen Sommerhalbjahr überschritten wird

Aufgrund ihrer nicht metrischen Skalierung, wurden die Parameter zum *zeitlichen Auftreten* (*Monat, Tageszeit*) der GE, nicht im Rahmen der Varianzanalyse, sondern separat, anhand ihrer Häufigkeitsverteilungen, mit denen der EO verglichen. Im Hinblick auf das monatliche Auftreten zeigen sich bei den GE gleichermaßen die Monate Mai bis Juli, aber auch der August, als die Monate mit den stärksten Ereignishäufigkeiten (Abb. 5.12a). Das Häufigkeitsmaximum der GE liegt hier einen Monat später als bei den EO, im Juli. Da für die Gegenanalyse lediglich die Monate April bis Oktober verwendet wurden, zeigen sich für die anderen Monate keine Ereignisse. Aufgrund der zu beiden Seiten hin abfallenden Verteilung, weisen die Ereignishäufigkeiten jedoch ebenso auf die bei den SFE beobachtete Saisonalität hin.

Im Hinblick auf das tageszeitliche Auftreten der GE, zeigen sich grundlegend ähnliche Häufigkeitsverhältnisse wie bei den SFE (Abb. 5.12b). Gleichermaßen treten die identifizierten Ereignisse über den gesamten Tagesgang auf. Dennoch stechen die Ereignisse, welche zwischen 12:50 bis 20:50 Uhr (mittags bis abends) stattgefunden haben, hier noch deutlicher hervor als bei den SFE.

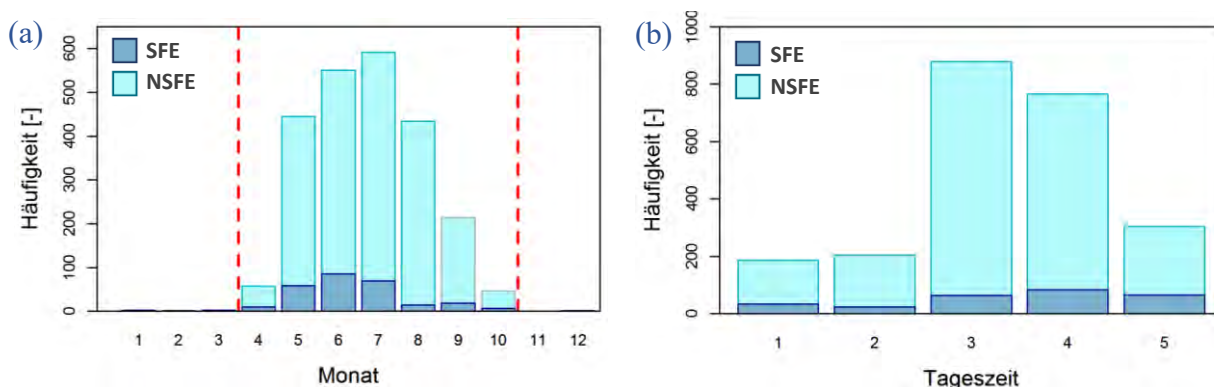


Abbildung 5.12: Häufigkeiten der SFE und NSFE im Vergleich nach monatlichem (Januar - Dezember; Trennlinien: Abgrenzung des Betrachtungszeitraums) und tageszeitlichem Auftreten (Früher Morgen (1), Morgen (2), Mittag (3), Abend (4) und Nacht (5)) (vgl. Kap. 4.2.1.2).

5.5.2 Logistische Regression

Die im Vorfeld der LR durchgeführte *Korrelationsanalyse* weist auf mehr oder weniger starke positive wie auch negative Korrelationen zwischen den Betrachtungsparametern hin (Abb. 5.13). Ein besonders, stark positiver Zusammenhang, ergibt sich dabei zwischen den Max. N-Stundensummen und den Ereignissummen, sowie zwischen den mittleren Fließgeschwindigkeiten und der Geländeneigung. Ebenfalls korreliert der Parameter der Max. Mittl. N-Intensität verhältnismäßig stark mit nahezu allen Niederschlagsparametern, bis auf die Ereignissumme und die N-Flächenmittelabnahme. Die stärksten negativen Korrelationskoeffizienten ergeben sich zwischen der Mittl. N-Intensität und der Ereignisdauer bzw. der mittleren

Geländehöhe und der mittleren Bodenfeuchte, sowie zwischen der mittleren Geländeneigung und dem mittleren Abflusskoeffizienten. Die geringsten Korrelationen mit anderen Parametern zeigen die Variablen Monat, Tageszeit, Ereignisdauer und N-Flächenmittelabnahme.

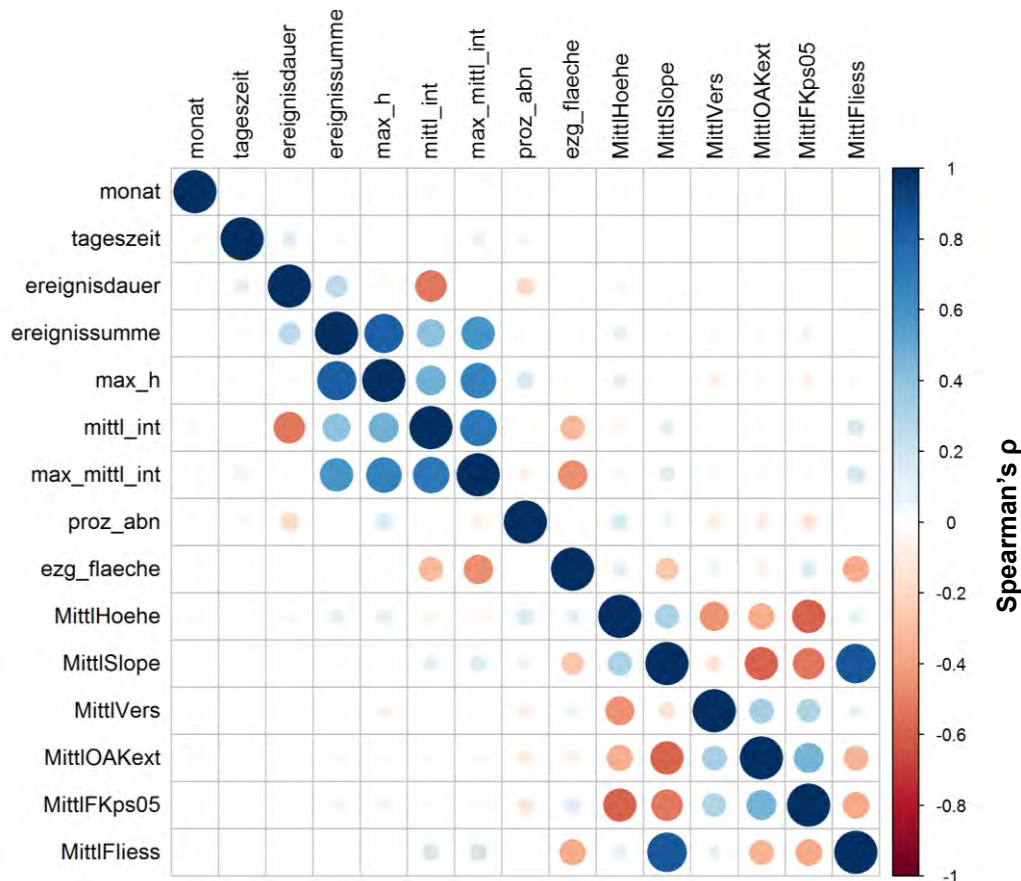


Abbildung 5.13: Korrelationsanalyse nach Spearman für die Parameter der Datentabelle, Richtung und Stärke der Korrelation dargestellt über Punktfarbe und -größe. Parameter: Monat (monat), Tagesszeit (tageszeit), Ereignisdauer (ereignisdauer), Ereignissumme (ereignissumme), Max. N-Stundensumme (max_h), Mittl. N-Intensität (max_mittl_int), N-Flächenmittelabnahme (proz_abn), EZG-Fläche (ezg_flaeche), Mittlere Geländehöhe (MittlHoehe), Mittlere Geländeneigung (MittlSlope), Mittlerer Versiegelungsgrad (MittlVers), Mittlerer Abflussbeiwert (mittlOAKext), Mittlere Bodenfeuchte (MittlFKps05), Mittlere Fließgeschwindigkeit (MittlFluess).

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus der Varianz- und Korrelationsanalyse, wurden über die im Kap. 4.4.2 beschriebene Methodik, die Parameter Max. N-Stundensumme, Max. Mittl. N-Intensität, EZG-Fläche, mittlere Geländeneigung und der mittlere Versiegelungsgrad als die finalen *Eingangsparameter der LR* festgelegt. Beim zu vorigen Testen der verschiedenen Eingangsparameterkombinationen zeigte sich, dass trotz signifikanten Gruppenunterschieden lediglich wenige der Parameter im Modell einen relevanten Einfluss auf die Eintrittswahrscheinlichkeit der SF aufweisen. Besonders die kombinierten Parameter (Mittlerer Abflussbeiwert, Mittlere Bodenfeuchte, Mittlere Fließgeschwindigkeit) haben im Modell mit am wenigsten Relevanz. Andere Parameter (Ereignisdauer, MittlSlope, Geländehöhe) hingegen weisen je nach

Eingangsparameterkombination teilweise einen schwachen, dennoch letztendlich ebenso vernachlässigbaren Einfluss auf. Die Parameter der Datentabelle, mit einem zu geringen bzw. nicht signifikanten Einfluss auf die SF-Eintrittswahrscheinlichkeit, wurden daher in der LR nicht weiter berücksichtigt. Die Parameter Max. N-Stundensumme und Max. Mittl. N-Intensität wurden zudem, trotz verhältnismäßig hoher Korrelation, verwendet, da das Modell durch Ausschluss einer dieser Variablen eine erheblich schlechtere Modellgüte lieferte. Die Ergebnisse der LR sind in Tab. 5.3 dargestellt.

Tabelle 5.3: Modellergebnisse der LR auf Basis des TRAIN-Datensatzes, y-Achsenabschnitt (b_0) = 2,1.

Parameter x	Bezeichnung	Koeffizient b	Odds $\frac{p}{1-p}$	Signifikanz (p -Wert)
Max. Mittl. N-Intensität	<i>max_mittl_int</i>	0,31	1,36	< 2e-16
Mittlerer Versiegelungsgrad	<i>MittlVers</i>	0,10	1,10	< 2e-16
EZG-Fläche	<i>ezg_flaeche</i>	0,02	1,02	0,003
N-Flächenmittelabnahme	<i>perz_abn</i>	- 0,19	0,83	1e-05
Max. N-Stundensumme	<i>max_h</i>	- 0,29	0,74	< 2e-16

Für das Modell ergibt sich die folgende logistische Verteilungsfunktion (Link-Funktion):

$$Y = 2,1 + 0,31 \max_mittl_int + 0,1 \text{MittlVers} + 0,02 \text{ezg_flaeche} - 0,19 \text{proz_abn} - 0,29 \max_h \quad (4)$$

Die getesteten Einflussvariablen zeigen positive wie negative Regressionskoeffizienten, wobei alle der identifizierten Einflüsse signifikant sind. Die Modellhypothese H_0 kann dementsprechend für alle, der hier betrachteten Variablen, abgelehnt werden (vgl. Kap. 4.4.2). Für die Parameter mit negativen Regressionskoeffizienten (Max. N-Stundensumme, N-Flächenmittelabnahme) verringert sich die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten einer SF mit steigenden Werten. Für die Variablen mit positiven Regressionskoeffizienten (Max. Mittl. N-Intensität, EZG-Fläche), zeigt sich mit steigenden Parameterwerten, hingegen ein positiver Effekt (Zunahme) auf die SF-Eintrittswahrscheinlichkeit. Die Regressionskoeffizienten ermöglichen dabei lediglich eine Aussage über die Wirkungsrichtung. Die Stärke des Einflusses kann quantitativ über die Odds festgemacht werden. Umso höher hier der absolute Wert, desto stärker der Variableneinfluss auf die Eintrittswahrscheinlichkeit. Der stärkste Variableneinfluss ergibt sich für den Parameter Max. Mittl. N-Intensität (mit 1,35) gefolgt vom mittleren Versiegelungsgrad (mit 1,11). Beide Variableneinflüsse sind hoch signifikant. Auch der Parameter EZG-Fläche hat mit 1,02 eine verhältnismäßig starke Wirkung auf die Eintrittswahrscheinlichkeit.

keit einer SF. Am wenigsten stark aber wiederum hoch signifikant sind die Einflüsse der Variablen N-Flächenmittelabnahme (mit 0,82) und Max. N-Stundensumme (mit 0,75).

Für jeden der betrachteten Fälle liefert das LR-Modell zudem die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Fall der Gruppe SF ja (1), angehört. Dieser Modelloutput ist in Abb. 5.14 für die 1826 betrachteten Fälle/ Ereignisse des TRAIN-Datensatzes dargestellt. Hier zeigt sich, dass die Ereignisse, für die das Modell eine niedrige Eintrittswahrscheinlichkeit ausgibt, auch häufig die Ereignisse sind, bei denen es in Realität zu keiner SF gekommen ist. Für die Ereignisse, wo in Realität SF aufgetreten sind, sagt das Modell auch überwiegend hohe Eintrittswahrscheinlichkeiten voraus. Vereinzelt zeigen sich auch Ereignisse mit hoher Eintrittswahrscheinlichkeit, bei denen in Realität keine bekannten SF aufgetreten sind und andersherum. Des Weiteren ist ein Übergangsbereich (ca. 0,2 – 0,4 %) erkennbar, indem sich bei ähnlichen SF-Wahrscheinlichkeiten verhältnismäßig viele Ereignisse beider Gruppenausprägungen zeigen.

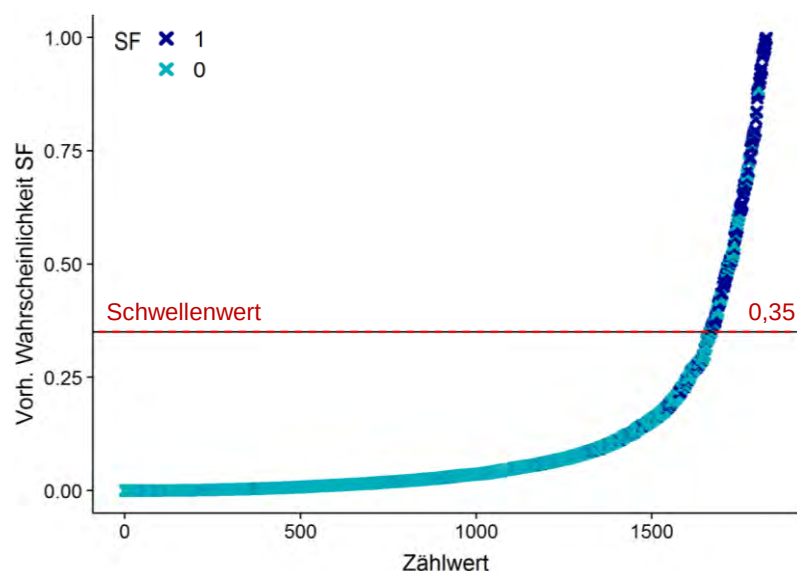


Abbildung 5.14: Mit LR-Modell vorhergesagte Wahrscheinlichkeiten (aufsteigend aufgetragen) für die Ereignisse des TRAIN-Datensatzes mit Bezug zur realen Ereignisausprägung SF ja (1)/ SF nein (0) und dem Schwellenwert

Der Youden-Index identifiziert den bestmöglichen Klassifikations-Schwellenwert bei einer Eintrittswahrscheinlichkeit von 0,35. Dieser wird im Anschluss zur Klassifikation der Ereignisfälle verwendet. Die Fälle mit einer SF-Eintrittswahrscheinlichkeit $\geq 0,35$ % werden dementsprechend der Gruppe SF ja (1) zugeordnet (Abb. 5.14).

Die Klassifikationsergebnisse sind in Tab. 5.4 dargestellt. Auf Basis dieser Klassifizierung ergibt sich für die Sensitivität (RP/ P) ein Wert von 0,61 und für die Spezifität (RN/N) ein Wert von 0,97. Die Sensitivität beschreibt dabei die Fähigkeit des Modells, ein SFE richtig zu erkennen. Für die Spezifität gilt gegenteiliges. Das LR-Modell ist dementsprechend deutlich

besser in der Lage NSFE zu erkennen als SFE. Dieser Zusammenhang zeigt sich auch beim Vergleich der prozentualen Anteile von falsch klassifizierten Werten. Gegenüber der Realität klassifiziert das Modell dabei deutlich mehr SFE (38,6 %; FP/P) falsch als NSFE (2,9 %; FN/N). Die Trefferquote des Modells $((RN+RP)/(N+P))$ ist mit 93 % dennoch sehr hoch. Neben der hohen Gesamtgenauigkeit, weisen auch die identifizierten Pseudo- R^2 nach Nagelkerke (0,47), McFadden (0,39) sowie der Cox und Snell Index (0,23) auf eine hohe Modellgüte hin.

Tabelle 5.4: Konfusionsmatrix der Klassifikationsergebnisse des LR-Modells für den TRAIN-Datensatz bei einem Schwellenwert von 0,35 %, RN = Richtig negativ; FP = Falsch positiv, FN= Falsch negativ, RP= Richtig positiv, N = Real negativ (gesamt), P = Real positiv (gesamt), N*= Vorhergesagt negativ (gesamt), P* = Vorhergesagt positiv (gesamt), Richtig klassifizierte Ereignisse in Blau hinterlegt.

	In Wahrheit negativ (keine SF)	In Wahrheit positiv (SF)	Summe
Vorhergesagt negativ (keine SF)	1589 (RN)	73 (FP)	1662 (N*)
Vorhergesagt positiv (SF)	48 (FN)	116 (RP)	164 (P*)
Summe	1637 (N)	189 (P)	1826 (N+P)

Bei der Anwendung des Modells auf den TEST-Datensatz zeigt sich, bei Betrachtung der vorhergesagten SF-Eintrittswahrscheinlichkeiten in Bezug zu den Realausprägungen der Ereignisse, ein ganz ähnliches Bild wie für den TRAIN-Datensatz. Das Modell liefert somit für den TEST-Datensatz überwiegend dort hohe Eintrittswahrscheinlichkeiten, wo in Realität Ereignisse aufgetreten sind und umgekehrt (Abb. 5.14/5.15).

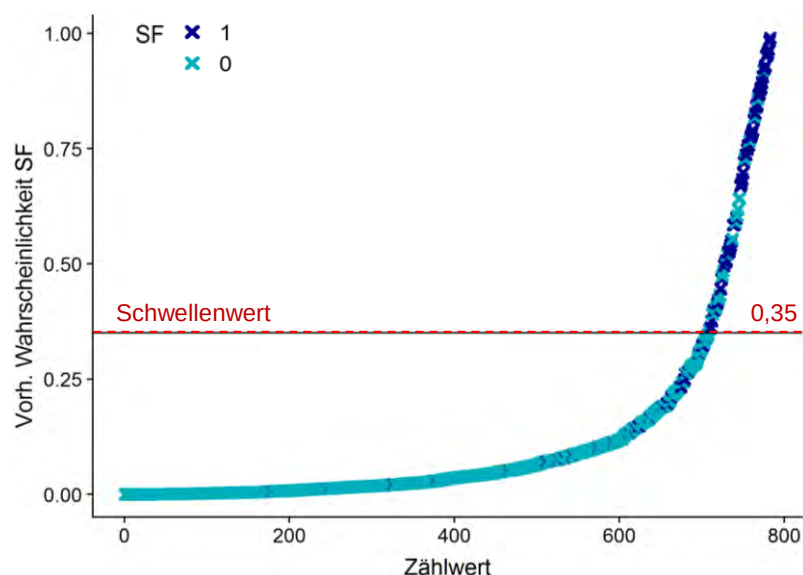


Abbildung 5.15: Mit LR-Modell vorhergesagte Wahrscheinlichkeiten (aufsteigend aufgetragen) für die Ereignisse des TEST-Datensatzes mit Bezug zur realen Ereignisausprägung SF ja (1)/ SF nein (0) und dem Schwellenwert

Trotz veränderter Datenbasis ergeben sich für die Klassifikationsergebnisse ganz ähnliche Werte der Sensitivität (0,63) und Spezifität (0,96) (Tab. 5.5). Auch hier werden gegenüber der Realität vom Modell, prozentual gesehen, deutlich mehr SFE (37,5 %) falsch klassifiziert als NSFE (3,7 %). Aufgrund der minimalen Unterschiede zeigt sich die gleiche Gesamttrefferquote wie zuvor (93 %). Das entwickelte Modell ist somit gleichermaßen geeignet für die Daten des TRAIN- sowie die des TEST-Datensatzes. Die Anwendbarkeit des LR-Modells auf die Daten des TEST-Datensatzes ist dementsprechend hoch.

Tabelle 5.5: Konfusionsmatrix der Klassifikationsergebnisse des LR-Modells für den TEST-Datensatz bei einem Schwellenwert von 0,35 %, RN = Richtig negativ; FP = Falsch positiv, FN= Falsch negativ, RP= Richtig positiv, N = Real negativ (gesamt), P = Real positiv (gesamt), N*= Vorhergesagt negativ (gesamt), P* = Vorhergesagt positiv (gesamt), Richtig klassifizierte Ereignisse in Blau hinterlegt.

	In Wahrheit negativ (keine SF)	In Wahrheit positiv (SF)	Summe
Vorhergesagt negativ (keine SF)	679 (RN)	30 (FP)	709 (N)
Vorhergesagt positiv (SF)	24 (FN)	50 (RP)	74 (P)
Summe	703 (N)	80 (P)	783 (N+P)

Auch die ROC-Kurve spiegelt, mit einem AUC-Wert von 0,92, eine hohe Modellgüte wieder. Die Klassifizierung des Modells ist somit vergleichsweise nah an einer idealen Zuordnung ($AUC = 1$) und damit deutlich besser, als eine rein zufällige Zuordnung ($AUC = 0,5$) (Abb. 5.16).

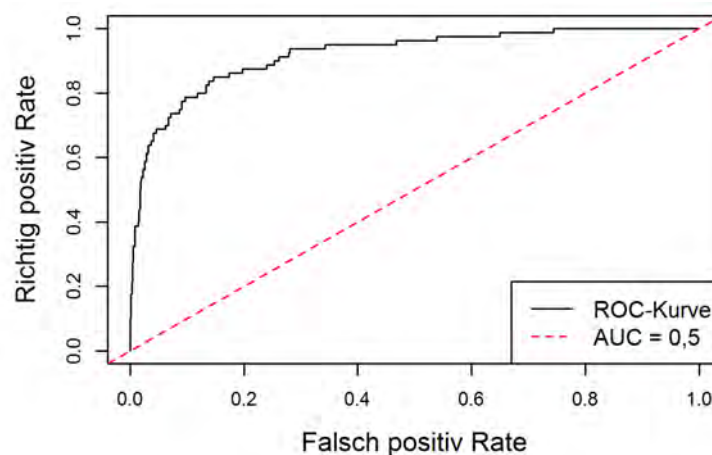


Abbildung 5.16: ROC-Kurve der Modellergebnisse des TEST-Datensatzes, $AUC = 0,91$; Richtige positiv Rate (Sensitivität), Falsch positiv Rate (1-Spezifität)

6. Diskussion

6.1 Räumliches und zeitliches Auftreten von SF (F1)

Zentrales Element zur Klärung von F1 bildet die aktualisierte SFE-Tabelle. Über die *räumliche Analyse* der Ereignisdaten ergeben sich die in Kap 5.3.1 beschriebenen Trends. Der West-Ost Trend sowie der Höhenlagentrend werden dabei mitunter auf eine grundlegende, klimatische Beeinflussung der Westwindzone zurückgeführt. Die feuchten Luftmassen der vorherrschenden Westwinde regnen sich dabei über den Landmassen ab und sorgen für eine zunehmende Austrocknung der Luftmassen gen Osten (Müller-Westermeier, 2001). Des Weiteren sorgen die Höhenzüge, durch orographische Effekte im Luv, für eine Abschirmung der im Lee liegenden Gebiete. Diese Effekte beeinflussen das allgemeine Niederschlagsgeschehen und bedingen dementsprechend das Auftreten der für SF relevanten SR. Dies beeinflusst potenziell auch die Verteilungsmuster der SF. Dahingegen wird angenommen, dass die geringen Ereignisdichten in Oberschwaben bzw. im Allgäu teilweise auf die Abschirmungseffekte des Schwarzwaldes und der Schwäbischen Alb zurückzuführen sind, die geringen Ereigniszahlen im direkten Alpenvorland hingegen auf die Abschirmung durch die Alpen. Das verstärkte Auftreten der SFE entlang des Schwarzwaldes und der Schwäbischen Alb wird mitunter auf SR und SF begünstigende orographische Effekte zurückgeführt.

Zudem ist auffallend, dass die Bereiche mit geringer SFE-Dichte sich meist mit Bereichen geringerer Bevölkerungsdichte decken (Hohenloher Ebene, Oberschwaben, Bauland). Hingegen zeigen sich Cluster von SFE in urban geprägten Räumen (vgl. Kap. 5.3.1, Karte 5.1). Zum einen kann hier angenommen werden, dass die Flächenversiegelung einen entscheidenden Einfluss auf die Bildung von SF nimmt. Zum anderen spiegelt sich ein methodischer Einfluss wider, da die dicht besiedelten Räume gleichermaßen auch die besser beobachteten Räume sind. In diesen Gebieten sind zudem meist deutlich mehr Personen von den Auswirkungen betroffen, sodass eine Berichterstattung über das Ereignis deutlich wahrscheinlicher ist. Die identifizierten Trends müssen somit unter diesen Gesichtspunkten eingeschränkt bewertet werden, denn eine Tatsache zeigt sich deutlich: SF können prinzipiell überall in BW auftreten.

Im Hinblick auf die Häufigkeit des *SF-Auftretens in der Vergangenheit*, zeigt die Analyse der Ereignisdaten über die Betrachtungszeitreihe eine unregelmäßige, jedoch tendenzielle Zunahme von SFE (vgl. Kap. 5.3.1). Betrachtet man dieses Ergebnis im Kontext der prognostizierten Zunahme von SR und SFE, erscheint das Ergebnis durchaus schlüssig (vgl. Kap. 2.1.3). Dennoch ist die Aussagekraft dieser Beobachtung sehr beschränkt und kann nicht als realer Trend

gewertet werden, sondern lediglich als mögliche Tendenz. Dies ist der Fall, da aufgrund der manuellen Ereignisauswahl ein hoher quantitativer Fehler angenommen wird. Dieser wird zum einen grundlegend von der Tatsache bestimmt, dass es sehr unwahrscheinlich ist, dass alle der überhaupt bekannten SFE in der Ereignistabelle aufgenommen werden konnten. Zum anderen ist auch die Zahl der nicht dokumentierten oder nicht beobachteten Ereignisse unbekannt. Auch ist ein individueller methodischer Fehler über die subjektive Auswahl der Ereignisse und die Vorgehensweise des Bearbeiters anzunehmen. So ist bspw. das Minimum im Jahr 2017 der beobachteten Häufigkeitszeitreihe mitunter auf die Tatsache zurückzuführen, dass die Zeitungs-Online-Mediatheken immer ausgehend vom neusten bzw. ältesten Artikel betrachtet wurden und nach einer gewissen Anzahl von Artikeln das Freikontingent der Leseartikel erschöpft war (vgl. Kap. 5.3.1, Abb. 5.1). Zudem hat die Berichterstattung zu SR und SF in den vergangenen Jahren, aufgrund der wachsenden Präsenz und Relevanz der Thematik deutlich zugenommen. Eine dahingehende Beeinflussung der Ereignisauswahl ist somit wahrscheinlich.

6.2 SF auslösende SR- Charakteristika (F2)

6.2.1 Niederschlagskennwerte EO

Mit dem Häufigkeitsschwerpunkt der SF auslösenden SR in den Sommermonaten, spiegeln die Ergebnisse die für SR typische *Saisonalität* wieder (vgl. Kap. 5.3.1, Abb. 5.2) (DWD, 2016). Gleichermaßen wie bei Merz und Blöschl (2013), lässt sich ein begünstigtes Auftreten für SF in den Sommermonaten feststellen. Das *tagezeitliche Auftreten* der SF induzierenden SRE folgt mehrheitlich dem für konvektive Niederschlagsereignisse typischen Aktivitätsschwerpunkt in den Nachmittags- bis Abendstunden (vgl. Kap. 5.3.2, Abb. 5.3) (Klose, 2008). Es zeigen sich jedoch auch SRE in den frühen Morgen- und Vormittagsstunden. Diese Ereignisse sind untypisch für konvektive Niederschlagssysteme. Der Literatur entsprechend, kann dahingehend angenommen werden, dass SF überwiegend durch konvektive Niederschläge hervorgerufen werden, dennoch nicht ausschließlich (Brasseur et al., 2017).

Die Ergebnisse zu den *Ereignisdauern* zeigen, dass sowohl kürzere als auch längere Ereignisdauern zu SFE geführt haben (vgl. Kap. 5.3.2). Zu welchem Zeitpunkt des Ereigniszeitraums die SF jedoch in Realität ausgelöst wurde, ist unklar. Kurzzeitige maximale Niederschlagsintensitäten zu Beginn des Ereignisses könnten dabei gleichermaßen Auslöser sein, wie die in der Gesamtheit applizierte Ereignissumme. Da lediglich die Ereignisdauern von 1 – 6 h in stündlichen Intervallen betrachtet wurden, ist für kürzere Intervalle sowie längere Ereignisdauern keine Aussage möglich. Es ist jedoch wahrscheinlich, dass ein Teil der als 6 h Ereignis klassifi-

zierten Ereignisse, durchaus längere Ereignisdauern in Realität gehabt haben. Für diese Ereignisse wurde dementsprechend lediglich der Schwerpunkt des Ereignisses, in dem die Hauptniederschlagssumme gefallen ist, mit einbezogen. Da lediglich Stundensummen betrachtet wurden, ist es zudem nicht möglich abzuschätzen, inwieweit der Niederschlag im gegebenen Zeitintervall gleichmäßig gefallen ist. So könnte bspw. die Niederschlagssumme der als 1 h Ereignis klassifizierten SFE auch gänzlich in einem Zeitfenster von 10 min gefallen sein. Die 1 h-Auflösung schränkt somit die Genauigkeit der Betrachtung sowie die Differenziertheit der Ergebnisse grundlegend ein.

Bei der Analyse der *Ereignissummen* zeigen sich für die MO im Schnitt merklich höhere Ereignissummen als für die EO. Der Ort, an dem die stärksten Auswirkungen auftreten, ist somit nicht zwangsläufig gleich dem Ort im näheren Umfeld, an dem auch die maximalen Niederschlagsbedingungen auftreten. Speziell zeigt sich dieser Zusammenhang über die verhältnismäßig vielen sehr niedrigen Ereignissummen an den EO, sowie die deutlich höheren Maximalwerte an den MO (vgl. Kap. 5.3.2, Abb. 5.4c/d). Es wird dahingehend angenommen, dass die Niederschlagsbedingungen am MO meist einen starken Einfluss auf die Bildung der SF haben bzw. mitunter charakteristischer für die Bildung einer SF sind, als die Niederschlagsbedingungen am eigentlichen EO selbst. Ein Ähnliches Bild ergibt sich beim Vergleich der *Max. N-Stundensummen*. Hier zeigen sich ebenso im Schnitt deutlich geringere maximale Stundensummen an den EO. Gleichmaßen wird hier davon ausgegangen, dass die Niederschlagscharakteristiken der EO nicht immer repräsentativ für die SF auslösenden SR sind. Ferner ergeben sich für EO wie MO auch Ereignissummen bzw. Max. N-Stundensummen von 0 bzw. von nahezu 0. Da Niederschlag eine notwendige Bedingung für die Bildung von SF bildet, werden diese Werte als unrealistisch eingestuft. Es wird hier ein negativer Einfluss durch einen methodischen Fehler vermutet. Eine mögliche Erklärung bietet der Umstand, dass die zeitliche Einordnung mancher Ereignisse auf Basis der Zeitungsberichte problematisch war, da die genauen Daten der Ereignisse nicht genannt wurden. In diesen Fällen musste, auf Basis der zur Verfügung stehenden Ereignisinformationen sowie der Erscheinungsdaten der Berichte, geschlossen werden, wann das Realereignis eingetreten ist. Es ist nicht auszuschließen, dass die Ereignisdaten teilweise falsch festgesetzt wurden und zu den beschriebenen Fehlwerten führen.

Einen konkreten *Niederschlagsschwellenwert* zu identifizieren, ab welchem SFE häufiger auftreten, ist für die Ereignissumme sowie die Max. N-Stundensummen speziell an den EO, aufgrund der verhältnismäßig vielen geringen Werte, schwierig (vgl. Kap. 5.3.2, Abb. 5.4c/e). Unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus der EO- und MO-Analyse wird jedoch angenom-

men, dass ein minimaler stündlicher Niederschlagsinput von 15 mm in der Mehrheit der Fälle notwendig war, um eine SF auszulösen (vgl. Kap. 5.3.2, Abb. 5.4c/e/d/f). Der Grenzwert für die Gegenanalyse wurde daher auch hier festgesetzt. Für die Ereignisse unterhalb dieses Schwellenwertes wird angenommen, dass weniger die stündlichen Max. N-Stundensummen ausschlaggebend für die Bildung dieser SFE ist, sondern vielmehr die Niederschlagsintensität eines kürzeren Zeitfensters. Diese These wird unterstützt von der Tatsache, dass bei diesen Ereignissen die Max. N-Stundensumme meist einen sehr hohen Anteil von bis zu 100 % an der Ereignissumme ausmacht (vgl. Kap. 5.3.2). Dieser These konnte aufgrund der stündlichen Auflösung der Analyse jedoch nicht weiter nachgegangen werden. Für die Ereignisse über dem Schwellenwert wird davon ausgegangen, dass die Wahrscheinlichkeit einer SF mit steigenden Kennwerten potenziell zunimmt. Ein oberer Grenzwert ist daher nicht notwendig.

6.2.2 Niederschlagskennwerte EZG

Bei Betrachtung der Niederschlagsbedingungen im EZG, weisen lediglich wenige Werte sehr hohe *Mittl. N-Intensitäten* über die gesamte Ereignisdauer auf (vgl. Kap. 5.3.2, Abb. 5.5a). Mit einem mehr als doppelt so hohem Median liegen die *Max. Mittl. N-Intensitäten* generell deutlich höher. Die Maximalbedingungen im EZG unterscheiden sich somit meist wesentlich von den mittleren Bedingungen im EZG (vgl. Kap. 5.3.2, Abb. 5.5a/b). Nichtsdestotrotz zeigen die *Mittl. N-Intensitäten* im EZG mitunter sehr hohe Durchschnittswerte. Für diese Ereignisse wird angenommen, dass der Großteil des EZG über die gesamte Ereignisdauer gleichermaßen stark von dem Niederschlagsereignis betroffen war. Diese Ereignisse bilden jedoch die Minderheit, dahingehend werden für die Mehrheit der Ereignisse mit geringeren *Mittl. N-Intensitäten* räumlich und zeitlich deutlich variablere Bedingungen vermutet. Die *Max. Mittl. N-Intensitäten* bestätigen dabei die zeitliche Variabilität für die EZG.

Vergleicht man die *maximalen Bedingungen am EO* mit den *maximalen Bedingungen für das gesamte EZG*, zeigt sich, dass in vielen Fällen die Maximalbedingungen im EZG verhältnismäßig ähnlich denen, an den EO sind (vgl. Kap. 5.3.2, Abb. 5.6). Umso weiter die Faktorenwerte dabei von der 1:1 Linie entfernt liegen, desto weniger spiegeln die maximalen Bedingungen am EO die durchschnittlichen, maximalen Bedingungen im EZG wider und umgekehrt. Ähnlich, wie bei dem Vergleich von EO und MO, lässt sich für die Ereignisse mit Faktorenwerten >1 , ein starker Einfluss des EZG auf die Bildung der SFE annehmen. Für die Ereignisse mit Faktoren <1 sind womöglich hingegen stärker die lokalen Bedingungen im direkten Umkreis der EO ausschlaggebend.

6.2.3 Niederschlagszellengrößen

Über die *N-Flächenmittelabnahmen* wird die auslösende Niederschlagsituation noch einmal näher charakterisiert. Die ermittelten N-Flächenmittelabnahmen führen dabei zu dem Schluss, dass in der Mehrheit der Fälle kleine Niederschlagszellen mit einem Durchmesser von 7,2 – 17,6 km für die SFE verantwortlich sind. Diese Größe entspricht in etwa der horizontalen Ausdehnung, wie sie für sommerliche (meist konvektive) Gewitter- und Schauerwolken (10 – 20 km) typisch ist (Klose, 2008). Auch für das Ereignis in Braunsbach zeigt sich eine Ausdehnung des Niederschlagsfeldes in dieser Größenordnung (vgl. Kap. 2.1.1, Abb. 2.1).

Für die Analyseereignisse wird dabei angenommen, dass die Größe des Niederschlagsfeldes aufgrund der verwendeten Methodik tendenziell unterschätzt wird. Grund für diese Annahme bildet die Tatsache, dass die N-Flächenmittelabnahmen auf Basis eines linearen Zusammenhangs bestimmt wurden (vgl. Kap. 4.2.1). Bei einigen Verteilungen der normierten Flächenmittel in Abhängigkeit zur Entfernung ist es jedoch der Fall, dass die Verteilung mit sinkendem normiertem Flächenmittel zunehmend abflacht. Über den vereinfachten linearen Zusammenhang kann dies nicht berücksichtigt werden, sodass der Auslauf der Verteilungskurve quasi frühzeitig abgeschnitten wird (vgl. Kap. 4.2.1, Abb. 4.3c). Es wird dahingehend stärker der Zellenschwerpunkt (Kernzone) berücksichtigt als die Ausläufer der Zelle. Nichtsdestotrotz hat sich die Beschreibung der Zusammenhänge über eine lineare Beziehung als am zielführendsten erwiesen. Am treffendsten werden über die lineare Beziehung kontinuierliche Abnahmen wiedergegeben. Abrupte Flächenmittelabnahmen, die vom einem zum anderen Rasterumkreis stattfinden, werden dabei deutlich weniger gut erfasst. Hier ergibt sich meist ein nicht signifikanter Zusammenhang, welcher im Folgenden dann aussortiert wurde. Für diese Ereignisse ist anzunehmen, dass hier noch kleinere Zellengrößen SF bildungsrelevant waren.

Eine starke Generalisierung der Zusammenhänge erfolgt zudem über die Annahme der kreisrunden Niederschlagszellen. Die Ergebnisse ermöglichen daher generell eher eine grobe Einschätzung zur Größe des Niederschlagsfeldes. Gleiches ergibt sich aus der Tatsache, dass die linearen Regressionen lediglich auf Basis von jeweils vier Datenpunkten durchgeführt werden. Die Genauigkeit der Analyse ist hier stark durch die räumliche Auflösung des Rasters vorgegeben. Vergleicht man letztendlich konkret, für ein Ereignis wie Braunsbach, die identifizierte Niederschlagszellengröße aus der SFE-Tabelle ($N\text{-Flächenmittelabnahme} 18,8 \text{ \%}/\text{km} \triangleq 10,6 \text{ km Zellendurchmesser}$) mit dem Radarbild des Maximalzeitpunktes, ergibt sich eine gute Übereinstimmung mit der Kernzone der Niederschlagszelle (vgl. Kap. 2.1.1, Abb. 2.1). Für

diese Stichprobe zeigt sich somit, trotz der methodischen Einschränkungen ein sehr gutes Ergebnis.

6.3 Vergleichbare SRE ohne SFE (F3)

6.3.1 Ereignisauswahl

Die Anzahl der hier identifizierten Ereignisse zeigt, dass allein in den drei ausgewählten Betrachtungsjahren eine Vielzahl an *ähnlichen Niederschlagssituationen* aufgetreten ist. Dabei sind die Jahre mit den häufigsten Grenzwertüberschreitungen und den meisten identifizierten Ereignissen gleichzeitig die Jahre, in denen in Realität die meisten SFE beobachtet wurden (vgl. Kap. 5.4.1, Tab. 5.1). Dahingehend wird angenommen, dass in den Jahren mit vielen beobachteten SFE gleichermaßen das SR-Potential zur Bildung von SF besonders hoch war. Dennoch führt nur ein sehr geringer Anteil dieser Ereignisse letztendlich in Realität zu einer SF. Für die in der Gegenanalyse identifizierten Ereignisse, im Vergleich zu den bekannten SFE, beträgt dieser Anteil im Schnitt etwa 4 %. Aufgrund der verwendeten Methodik, sind diese 4 % der SFE dabei fast ausschließlich als urbane SF einzuordnen. Davon ist auszugehen, da SFE überwiegend lediglich dort dokumentiert werden, wo sie auch zu Schäden führen und dies primär im urbanen Umfeld der Fall ist. Im Hinblick auf die urbanen SFE im Allgemeinen wird angenommen, dass diese in BW annähernd vollständig, in irgendeiner Weise von den lokalen Medien dokumentiert sind. Für die SFE-Tabelle ist hingegen wahrscheinlich, dass lediglich ein Großteil dieser Ereignisse (geschätzt 2/3) für die hier betrachteten Jahre erfasst werden konnte. Wird dies bei der Berechnung des Anteils berücksichtigt, lässt sich vermuten, dass in etwa 5 % der GE mit SF-Potential in BW, zu einer urbanen SF führen. Hier werden jedoch die unbeobachteten SFE völlig außer Acht gelassen. Dahingehend ist ebenso anzunehmen, dass der reale Gesamtanteil der SRE mit SF-Potential, welche in BW zu einer SF geführt haben, noch einmal höher liegt. Dieser Anteil ist hier jedoch nicht quantifizierbar.

Dass sich speziell im extremen Trockenjahr 2018 dabei für die betrachteten Monate die häufigsten und nahezu flächendeckenden Grenzwert-Überschreitungen zeigen, ist erstaunlich (DWD, 2018c). Da 2018 jedoch in Realität auch viele SFE aufgetreten sind, ist dieses Ergebnis nicht unplausibel. Vielmehr wird angenommen, dass wenn Niederschläge im Jahr 2018 eingetreten sind, diese sehr intensiv waren. Auch wird vermutet, dass im Zuge der extremen Trockenheit die Böden mitunter verstärkt hydrophobe Eigenschaften entwickelt haben (Fohrer et al., 2016). Diese Oberflächenabfluss fördernden Bedingungen, in Kombination mit den intensiven Niederschlägen, haben dann voraussichtlich begünstigt zu SFE geführt.

6.3.2 Räumliche Analyse

Die Frage, wo in BW Ereignisse mit ähnlicher Niederschlagscharakteristik aufgetreten sind, kann über die Ergebnisse der *räumlichen Analyse* eingeordnet werden (vgl. Kap. 5.4.2). Für alle drei Betrachtungsjahre sind derartige Ereignisse in ganz BW verteilt aufgetreten. Die Schwerpunkte der Ereignisdichten variieren dabei von Jahr zu Jahr, wodurch sich keine klaren, allgemeingültigen Muster auf Basis der einzelnen Jahre feststellen lassen. Dies gilt für die grundlegende, sowie auch für die weiterführende, nach der Ereignisstärke differenzierte, räumliche Betrachtung. Im Gegensatz zur Auswertung des DWD hinsichtlich der warnschwellenüberschreitenden Niederschlagsstunden, weisen die Ereignisse der „SR“- Warnstufe (15 bis < 25 [mm/h]) keine bevorzugte Bindung an Höhenlagen auf (vgl. Kap. 2.1.3 Abb. 2.2/ Kap. 5.4.2 Abb. 5.9) (Winterrath et al., 2017). Dies ist gleichwohl, bei der Betrachtung der gesamtheitlichen Auswertung für die drei Beobachtungsjahre der Fall. Im Hinblick auf die Höhenzüge bleibt hier unklar, ob diese einen Einfluss darauf haben, dass die höchsten Intensitäten verstärkt in der Südhälfte von BW anzutreffen sind oder ob dies rein zufällig für die drei Beobachtungsjahre der Fall ist. Die Repräsentativität der Ergebnisse ist aufgrund der geringen Anzahl der Betrachtungsjahre grundsätzlich eingeschränkt. Elementar zeigt sich dennoch eine hohe Variabilität im Hinblick auf die jährliche Häufigkeit, sowie im Hinblick auf die Intensität der identifizierten Ereignisse. Vergleicht man die Orte, an denen in der Vergangenheit SFE aufgetreten sind, mit den Orten der Gegenanalyse, zeigen sich keine eindeutigen Parallelen (vgl. Kap. 5.5.1, Karte. 5.1/ Abb. 5.9).

6.4 SF-Einflussfaktoren (F4)

6.4.1 Varianzanalyse

Über die *Varianzanalyse* konnten für nahezu alle der untersuchten Niederschlags- sowie Gebietsparameter signifikante Gruppenunterschiede festgestellt werden (vgl. Kap. 5.5.1, Tab. 5.2). Bei signifikanten Gruppenunterschieden unterscheiden sich die Parameterwerte der Gruppe „SF ja“ somit wesentlich von den jeweiligen Parameterwerten der Gruppe „SF nein“. Es wurde dahingehend angenommen, dass ein Parameter mit signifikantem Gruppenunterschied potenziell SF bildungsrelevant ist. Die Varianzanalyse ermöglicht auf diese Weise bereits eine Einschätzung hinsichtlich der Bedingungen, welche SF potenziell begünstigen oder hemmen. In Bezug auf die identifizierten Gruppenunterschiede der Gebietsparameter ist zu berücksichtigen, dass diese jeweils auf einem konkreten Istzustand zum Zeitpunkt der Datenaufnahme beruhen. Dieser wird für alle Ereignisse gleichermaßen verwendet. Die dynamische Entwicklung

der Parameter über die Zeit wird somit nicht in die Analyse mit einbezogen. Für anthropogen bedingte Gebietsparameter wird dieser Einfluss grundsätzlich als stärker angenommen als für physikalisch basierte Parameter. Im Hinblick auf die Identifizierung der Gruppenunterschiede der Niederschlagsparameter, hat sich der beschränkte SFE-Datensatz als deutlich geeignetere Vergleichsbasis erwiesen. Dies ist der Fall, da der Vergleich der Ereignisse auf Basis gleicher Kriterien erfolgt und dahingehend deutlich aussagekräftiger ist. Auf diese Weise kann zudem ein starker methodischer Fehler ausgeschlossen werden. Die hier gewonnenen Ergebnisse werden somit denen des Gesamtdatensatzes übergeordnet. *UHI kann dementsprechend für alle untersuchten Parameter, mit Ausnahme des Parameters Mittlere Geländeneigung, angenommen werden.*

6.4.2 Logistische Regression

Im Allgemeinen ist bei der Interpretation der Modellergebnisse zu beachten, dass ein statistisches Modell die Zusammenhänge lediglich in einer sehr generellen Form wiedergibt (Blöschl et al., 2013). Das Modell findet dabei Zusammenhänge zwischen Parametern, welche in Realität nicht immer gegeben sein müssen. Auch die Übertragbarkeit der Ergebnisse von beobachteten in unbeobachtete EZG ist lediglich eingeschränkt möglich.

Im Zuge der LR konnten auf Basis der potenziell relevanten Parameter die Kennwerte identifiziert werden, welche den stärksten Einfluss auf das Auftreten der bekannten SFE nehmen (vgl. Kap. 5.5.2). Bei der Auswahl der finalen Eingangsparameter zeigte sich, dass trotz signifikanter Gruppenunterschiede lediglich wenige der Parameter im Modell einen relevanten Einfluss auf die Eintrittswahrscheinlichkeit der SF aufweisen. Keine Relevanz im Modell bedeutet hier jedoch nicht zwangsläufig, dass keinerlei Einfluss auf das Auftreten von SF besteht, sondern lediglich, dass der Einfluss dieser Parameter im Verhältnis zum Einfluss der ausschlaggebenden Parameter so gering ist, dass er sich im Modell als nicht relevant ergibt.

Die am stärksten einflussnehmenden Parameter sind die Kennwerte Max. Mittl. N-Intensität, Mittlerer Versiegelungsgrad, EZG-Fläche, N-Flächenmittelabnahme sowie Max. N-Stundensumme (vgl. Kap. 5.5.2). Dieses Ergebnis überschneidet sich wesentlich mit dem Ergebnis der Fallstudie von Diakakis et al. (2016). In dieser werden die Parameter Versiegelungsgrad, Ereignissumme und EZG-Fläche (positiver Einfluss) als die drei einflussstärksten Faktoren im Hinblick auf die Verteilung der Überschwemmungen bei einer SF identifiziert. Der Versiegelungsgrad erweist sich in beiden Untersuchungen somit als sehr relevanter, positiver Einflussfaktor. Dieser Parametereinfluss muss jedoch wiederum unter dem Gesichtspunkt

betrachtet werden, dass beide Untersuchungen auf urbanen SFE basieren und der Zusammenhang somit methodisch beeinflusst ist. In beiden Untersuchungen stellten sich zudem jeweils ein Niederschlagskennwert, sowie die EZG-Fläche als besonders maßgebend heraus. Als weniger stark, aber dennoch relevant, ergibt sich auch der Einfluss der Max. N-Stundensumme. Dieser ist speziell auffällig, da sich hier ein negativer Einfluss auf die Eintrittswahrscheinlichkeit der SF zeigt. Im Hinblick auf diesen Zusammenhang wird angenommen, dass dieser stark methodisch bedingt ist. Betrachtet man dahingehend den Gruppenunterschied der Max. N-Stundensumme fällt auf, dass der Median der SFE geringer ist als der Median der NSFE und dieser wiederum geringer als der Median der eingeschränkten SFE (162) (vgl. Kap. 5.5.1, Tab. 5.2). Da die LR auf Basis aller SFE und NSFE durchgeführt wurde, gibt die LR den Zusammenhang zwischen den SFE und NSFE grundlegend gleich wieder. Dennoch besteht hier wiederum das Problem, dass die Ereignisse auf Basis ungleicher Ausgangskriterien verglichen werden. Für den Parameter Max. N-Stundensumme wird daher angenommen, dass er einen starken Einfluss auf das Modell als erklärende Variable hat, der identifizierte Einfluss jedoch letztendlich wenig repräsentativ für die Realverhältnisse ist. Für die Max. Mittl. N-Intensität gilt dies nicht, da hier der Median der SFE sowie der Median der beschränkten SFE (162) höher ist, als der Median der NSFE und die Richtung des Einflusses somit keinen Widerspruch ergeben.

Im Hinblick auf diese Problematik wurde in Betracht gezogen, die LR ebenfalls auf Basis des beschränkten SFE (162) Datensatzes durchzuführen. Diese Idee wurde jedoch verworfen, da hier über 1/3 der Ereignisse mit den zugehörigen Gebietsinformationen aussortiert hätten werden müssen und dies nicht als zweckdienlich erachtet wurde. Bezüglich des Einflusses der N-Flächenmittelabnahmen auf die Eintrittswahrscheinlichkeit der SF hat sich gezeigt, dass kleinere Zellengrößen die Eintrittswahrscheinlichkeit von SFE hier nicht positiv beeinflussen. Hier wird vermutet, dass die Zellen womöglich eine ausreichende Mindestgröße besitzen müssen um die notwendige Intensität, aber auch die notwendige Überdeckung des EZG zu gewährleisten. Der bei Diakakis et al. (2016) als signifikant identifizierte Einfluss der Parameter Geländeneigung und -höhe konnte nicht bestätigt werden. Allerdings zeigte der Parameter der Geländeneigung, bei Hinzunahme zum verwendeten LR-Modell, mit einem p-Wert von 0,07 einen Einfluss nahe des Signifikanzniveaus. *Im Rahmen der LR konnten somit die stark einflussnehmenden Kennwerte differenziert und abgegrenzt werden, sodass UH2 angenommen wird.*

Das entwickelte LR-Modell ermöglicht es dabei mit einer hohen Modellgüte, die SFE von den NSFE zu differenzieren. Dies gilt gleichermaßen für den TRAIN- sowie den TEST-Datensatz

(Kap. 5.5.2, Abb. 5.14/5.15). Die Wahl des Klassifikations-Schwellenwertes hat sich dabei als sehr entscheidend für das letztendliche Klassifikationsergebnis herausgestellt. Trotz der hohen Gesamtgüte des Modells, zeigen die Klassifikationsergebnisse für den TEST- sowie den TRAIN-Datensatz, dass ca. 40 % der realen SFE vom Modell nicht als SFE klassifiziert werden (vgl. Kap. 5.5.2). Absolut betrachtet, sind das im Vergleich zur Grundgesamtheit zwar verhältnismäßig wenige Ereignisse, dennoch zeigt es, dass das Modell weitaus weniger geeignet ist, um SFE zu identifizieren, wie es über die Gesamttrefferquote vermutet werden könnte. Die Eignung des Modells zu Vorhersage wird infolgedessen als sehr beschränkt angesehen. Sollte dies dennoch das Ziel sein, besteht grundlegend über das Herabsetzen des Klassifikations-Schwellenwertes die Möglichkeit, mehr NSFE als SFE zu klassifizieren und auf diese Weise weniger schwerwiegende Klassifikationsfehler zu begehen. Dementsprechend wäre es sinnvoller, vorsichtshalber häufiger SFE vorherzusagen und gleichwohl davor zu warnen, als keine SFE vorherzusagen und das Risiko einzugehen, dass dennoch eine SF eintritt. Die Fähigkeiten des Modells im analytischen Bereich werden dahingehend als deutlich besser eingeschätzt, als dessen Vorhersagefähigkeiten. Mit Blick auf die Klassifikationsergebnisse des Modells wird aufgrund dieser Einschätzung angenommen, dass das Modell womöglich auch in der Lage ist, unbeobachtete Ereignisse rückwirkend zu identifizieren. Speziell die Ereignisse, bei denen das Klassifikationsergebnis ein SFE ausgibt und in Realität kein SFE bekannt ist (FN), werden als potenziell unbekannte bzw. unbeobachtete Ereignisse eingestuft (vgl. Kap. 5.5.2, Tab. 5.4/5.5). Es ist dabei davon auszugehen, dass wiederum nicht 100 % von diesen Ereignissen vom Modell richtig klassifiziert werden. Dahingehend wird ein vergleichbarer prozentualer Fehler wie bei den Realereignissen, welche vom Modell nicht als solche erkannt wurden, angesetzt (40 %). Unter dieser Annahme ergeben sich für den TEST-Datensatz somit 29 und für den TRAIN-Datensatz 14 zusätzliche, bisher nicht betrachtete, unbekannte oder unbeobachtete SFE. Die entspricht zusätzlichen 16 % der bekannten Ereignisse.

Auf Basis der erlangten Ergebnisse ist es nicht möglich, UH3 uneingeschränkt anzunehmen. Anhand einer gegebenen Parameterkombination kann über die SF-Eintrittswahrscheinlichkeit und die anknüpfende Klassifikation nämlich zwar die voraussichtliche Ereignisausprägung bestimmt werden, dennoch ist diese letztendlich nur für einen Teil der Ereignisse zutreffend. Die Differenzierbarkeit auf Basis der charakteristischen Variablenzusammenhänge ist somit eingeschränkt. Folglich kann lediglich das Auftreten für einen Teil der SFE in BW über charakteristische Parameterzusammenhänge erklärt werden. UH3 ist somit nicht allgemeingültig anzunehmen, sondern trifft lediglich für einen Teil der untersuchten Ereignisse zu.

6.5 Eignung der Radardaten

Für die Verwendung von Radardaten gelten gewisse Rahmbedingungen, welche im Hinblick auf die Analyseergebnisse zu berücksichtigen sind. So ergeben sich für die Radardaten aufgrund des Messerverfahrens einige Unsicherheiten. Da bei der Radarmessung der Niederschlag lediglich indirekt über die Reflektivität der elektromagnetischen Wellen bestimmt wird, können die hier erhaltenen Werte nicht mit realen Messwerten gleichgesetzt werden (Winterrath et al., 2017). Die Quantifizierung des Niederschlags ist dahingehend ungenau und mit starken Unsicherheiten behaftet. Diese werden zum hohen Maß durch Störeinflüsse auf das Radarsignal, welche von bspw. Gebäuden, Windrädern, Vögeln oder ähnlichen hervorgerufen werden, bedingt. Im Hinblick auf die verwendeten RW-Radardaten (korrigiert und angeeicht) des DWD wird angenommen, dass diese Einflüsse bereits im Vorhinein der Analyse auf ein Mindestmaß reduziert wurden. Nichtsdestotrotz ist von einem quantitativen Restfehler für die Niederschlagswerte auszugehen. So wird die Stärke dieses Fehlers aufgrund der Beeinflussung durch lokale Gegebenheiten als variabel angenommen. Dennoch kann aufgrund der ausschließlichen Verwendung von Radardaten von einer konsistenten Fehlerquelle ausgegangen werden.

Erschwert wird die Niederschlagsanalyse dabei durch das Datenausmaß (Anzahl, Größe) der erforderlichen Rasterdaten. Die Verarbeitung der Daten ist hier sehr zeitaufwendig und lediglich durch einen hohen Grad an Automatisierung möglich. Des Weiteren ist die Präzision der Analyse, sowie die zugehörige Aussagekraft des Ergebnisses, mitunter wesentlich von der räumlichen und zeitlichen Auflösung des Datensatzes eingrenzt (vgl. Kap. 6.2). Gleichzeitig ermöglicht die Auflösung der Daten im Gegenzug jedoch, dass verhältnismäßig viele Ereignisse im zur Verfügung stehenden Zeitrahmen gleichzeitig betrachtet werden können. Als überaus vorteilhaft ergibt sich zudem die gute Zugänglichkeit der DWD-Radardatenprodukte (konkret des RW-Produktes). Auf diese Weise ist es auch im Verlauf der Untersuchung möglich flexibel auf gewonnene Ergebnisse zu reagieren und die Analyse somit anzupassen. Den Hauptvorteil der Radardaten bildet jedoch die flächenhafte Verfügbarkeit der Daten. Lediglich auf diese Weise ist es möglich, verhältnismäßig einfach für alle der landesweit verteilten Ereignisse geeignete Grundlagendaten zu erhalten und die Niederschlagsanalysen einheitlich durchzuführen.

6.6 Präsenz der SF-Thematik

Im Zuge der Ereignisrecherche zu bekannten SFE auf Basis der durchsuchten Medienberichte hat sich ein Aspekt als sehr kennzeichnend herauskristallisiert (vgl. Kap. 5.3.1). Dieser betrifft die Tatsache, dass die Begrifflichkeit SF in den deutschsprachigen, öffentlichen Medien offen-

bar bisher nur wenig verankert ist und lediglich selten konkret thematisiert wird. Vielmehr werden die Umstände häufig undifferenziert als Folgeerscheinungen von SR betrachtet und nicht weitergehend abgegrenzt. Die Begrifflichkeit wird bisher somit nur sehr wenig zur Einordnung vergangener SR-Auswirkungen verwendet. Dahingehend wird angenommen, dass auch das Risikobewusstsein der Gesellschaft bisher nur wenig sensibilisiert ist für diese speziellen SR-Auswirkungen. Der SR-Begriff steht hier deutlich stärker im Fokus der Öffentlichkeit. Ein möglicher Grund dafür ist, dass der SF-Begriff noch verhältnismäßig jung und unbekannt ist oder zum anderen, dass die Kriterien zur Abgrenzung des Begriffs bisher nicht ausreichend klar sind. Es ergibt sich die grundlegende Frage, ab wann ein Ereignis als SF abgegrenzt werden kann. Basierend auf dem aktuellen Stand des Wissens zu SF, können hier verschiedene charakteristische Kriterien als Anhaltspunkte zur Einordnung der Ereignisse dienen (vgl. Kap. 2.1.1/ 4.1.1). Trotz dieser Kriterien fällt die Einordnung nicht leicht, da die Ereignishintergründe bzw. Ursachen teilweise nicht ausreichend bekannt sind und die relevanten Prozesse fließend ineinander übergehen. Eindeutig ist die Abgrenzung meist lediglich dort, wo sehr extreme Ereignisse auftreten (bspw. Braunsbach, Simbach). Diese werden dann auch sehr klar als SFE eingeordnet und kommuniziert (Rutschmann, 2017). Die Einordnung der schwächeren SFE wird somit subjektiv beeinflusst.

Auf Basis dieser Umstände wird davon ausgegangen, dass die geringe Verwendung der Begrifflichkeit somit mitunter auf die Schwierigkeit der Ereignisabgrenzung zurückzuführen ist. Auch ist anzunehmen, dass sich diese Gegebenheit negativ auf die Datenlage zu SFE auswirkt.

6.7 Offene Aspekte

Mit Blick in die Zukunft werfen die Untersuchungsergebnisse thematische Teilaspekte auf, welche einen noch offenen Handlungs- bzw. Klärungsbedarf besitzen. Hier ergibt sich gleichwohl Potential für weiterführende Untersuchungen.

Im Hinblick auf die Verwendung des zusammengestellten Grundlagendatensatzes zu bekannten SFE, wäre eine Vervollständigung und fortwährende Aktualisierung des Datensatzes, angesichts zukünftiger und noch stärker fundierter Analysen, sehr sinnvoll. Über eine freie Zugänglichkeit zu einem aktuellen SF-Ereigniskatalog für BW, würde sich die Datenlage zu SFE in BW, deutlich verbessern. Des Weiteren besteht Klärungsbedarf im Hinblick auf die Abgrenzung von SFE. Die konkreten Kriterien, nach denen auch „kleinere“ SFE eindeutig abgegrenzt werden können, sollten hier klar kommuniziert und vereinheitlicht werden.

Bezüglich der durchgeführten Niederschlagsanalyse wäre es zudem interessant, die Auswertung auf Basis einer feineren räumlichen bzw. zeitlichen Auflösung durchzuführen. Die verfeinerte Betrachtung der zeitlichen Komponente wird dabei speziell im Hinblick auf kurze Ereignisdauern mit sehr hohen Niederschlagsintensitäten als aufschlussreich betrachtet. Eine solche Untersuchung könnte zunächst lediglich für SRE mit kurzen Ereignisdauern und geringeren Max. N-Stundensummen durchgeführt werden. Ziel einer verfeinerten räumlichen Rasterauflösung könnte hingegen sein, die Niederschlagsbedingungen speziell für kleine EZG, die bisher nur über wenige Pixel abgebildet werden, weiter zu differenzieren und so besser abzubilden. Bezüglich der Charakterisierung der SF auslösenden Niederschlagssituationen, wäre es auch interessant die Geschwindigkeit mit der die Zellen sich bewegen näher zu betrachten. Hier könnte sich zeigen inwieweit die Stationarität einer Zelle Einfluss auf das Auftreten von SF hat. Zudem wäre es denkbar, den Fokus der Betrachtung weiter einzuschränken und noch stärker die Realbedingungen vor Ort mit in die Analyse einzubeziehen (bspw. über eine bessere EZG-Abgrenzung). Da in der Analyse lediglich eine Auswahl von Niederschlags- und Gebietsparametern betrachtet wurde, könnte die Analyse noch um zusätzliche, als relevant erachtete Kennwerte, erweitert werden (bspw. Geometrie des EZG).

Mit Blick auf die räumliche Auswertung der GE wäre es denkbar, nicht lediglich drei ausgewählte Jahre zu betrachten, sondern die Analyse für alle Jahre durchzuführen, für die Radardaten verfügbar sind. Dies würde die Repräsentativität der zugehörigen Ergebnisse erhöhen.

Die LR könnte zudem auch für den beschränkten Ereignisdatensatz (SFE 162) durchgeführt werden, um dann zu vergleichen, inwieweit sich Unterschiede bei den ausschlaggebenden Einflussfaktoren ergeben. Des Weiteren wäre es mit Blick auf die Klassifikationsergebnisse der LR interessant, nachzuprüfen ob an den Orten, für die das LR-Modell unbekannte SFE (FN) vorhersagt, in Realität charakteristische Auswirkungen aufgetreten sind (vgl. Kap. 5.5.2, Tab. 5.4/5.5). Das Modell könnte auf diese Weise weiter validiert werden. Auch wäre es denkbar, die LR nicht für alle Jahre gemeinsam, sondern stärker differenziert durchzuführen und dann zu beobachten, inwieweit sich die Zusammenhänge ändern.

7. Schlussfolgerung

In Rahmen dieser Arbeit wurden die Bedingungen, unter welchen in der Vergangenheit SF in BW auftreten sind, umfassend analysiert und die einflussstärksten Faktoren im Hinblick auf das Auftreten vergangener SF in BW identifiziert. Als Analysegrundlage diente dabei der eigens aktualisierte Ereigniskatalog zu SFE in BW, in dem die bekannten SFE im Zeitraum von 1980 - 2018 zusammengefasst wurden. Bereits im Zuge der Erstellung des Datensatzes hat sich dabei herausgestellt, dass die Begrifflichkeit SF in den deutschsprachigen Medien bisher wenig verankert ist und bei der Abgrenzung bzw. Einordnung der Ereignisse noch Klärungsbedarf besteht. Die räumliche Untersuchung der SFE im Ereigniskatalog hat ergeben, dass diese Ereignisse in der Vergangenheit dabei grundsätzlich landesweit in BW aufgetreten sind, es sich zudem aber auch räumliche Trends identifizieren lassen. Im zeitlichen Auftreten der SFE konnte keine trendmäßige Entwicklung identifiziert, sondern lediglich eine positive Tendenz der SF-Häufigkeiten im Verlauf der Zeitreihe beobachtet werden.

Um differenziert einordnen zu können, welche SR Eigenschaften eine SF begünstigen, wurde auf Basis des Ereigniskatalogs in Kombination mit den Radardaten eine umfassende Analyse und Charakterisierung der SF auslösenden Niederschlagsbedingungen durchgeführt. Die Radardaten haben sich hier als sehr geeignetes Werkzeug zur flächendeckenden Niederschlagsanalyse erwiesen. Die durchgeführten Datenanalysen erwiesen sich im Gegenzug allerdings auch als sehr zeitaufwendig. Soweit vergleichbar, stimmen die erhaltenen Analyseergebnisse gut mit den Angaben aus der Literatur überein. Als wesentlich für das Eintreten einer SF erwiesen sich dabei nicht ausschließlich die Niederschlagsbedingungen am EO selbst, sondern auch die Gesamtbedingungen im zugehörigen EZG. Des Weiteren hat sich grundlegend, unter den diskutierten Einschränkungen herausgestellt, dass es für ein Ereignis mit einer Max. N-Stundensumme von < 15 mm wenig wahrscheinlich ist, dass eine SF ausgelöst wird. Niederschlagsereignisse über diesem Grenzwert haben hingegen ein erhöhtes Potential zur Bildung von SF. Hinsichtlich der Analyse zu den Niederschlagszellengrößen hat sich gezeigt, dass das verwendete Vorgehen plausible Ergebnisse liefert und eine effektive Möglichkeit bietet, um die ungefähre räumliche Ausdehnung des Schwerpunktes einer Niederschlagszelle einzuordnen.

Auf Basis der Radardaten konnten im Zuge der Gegenanalyse die Orte in BW identifiziert werden, an denen es in den ausgewählten Betrachtungsjahren (2008, 2013, 2018), bei ähnlicher Niederschlagscharakteristik zu keinen bekannten SF gekommen ist. Die systematische Ereignisauswahl über die Festsetzung eines Niederschlagsgrenzwertes hat sich hier als sehr zielfüh-

rend erwiesen. Des Weiteren hat sich grundlegend herausgestellt, dass in Jahren mit vielen bekannten SFE gleichermaßen das SR-Potential zur Bildung von SF besonders hoch ist. Dabei führte weitaus nicht jedes der potenziell als SF-bildungsrelevant eingestuften Ereignisse in Realität zu einer SF. Lediglich bei einem sehr geringen Anteil war dies der Fall. Basierend auf den Ergebnissen der Gegenanalyse wurde dieser Anteil für urbane SFE, im Schnitt auf 5 % abgeschätzt. Die einzelnen Betrachtungsjahre zeigten im Hinblick auf die räumliche Verteilung der in der Gegenanalyse identifizierten Ereignisorte dabei eine hohe Variabilität. Als eindeutig erwies sich lediglich die Tatsache, dass die Ereignisse landesweit verteilt aufgetreten sind.

Um beurteilen zu können, welche Niederschlags- und Gebietsfaktoren eine Rolle für die Bildung von SF spielen, wurden für die zuvor aufbereiteten Parameter, mittels einer Varianzanalyse, signifikante Unterschiede für die Ereignisgruppen „SF ja“ und „SF nein“ ermittelt. Für nahezu alle der untersuchten Niederschlags- und Gebietsparameter konnten dabei signifikante Gruppenunterschiede festgestellt werden, sodass diese als SF bildungsrelevant eingestuft wurden. Die Gruppenunterschiede ermöglichten zudem Rückschlüsse auf die Bedingungen welche SF begünstigen oder hemmen. Über ein LR- Modell wurden im Folgenden die individuellen Einflüsse, der SF bildungsrelevanten Niederschlags- und Gebietsparameter, auf die Eintrittswahrscheinlichkeit einer SF quantifiziert. Die identifizierten Einflüsse erwiesen sich dabei als sehr unterschiedlich relevant für die Bildung der SFE. Nur wenige der getesteten Parameter hatten dabei letztendlich einen signifikanten Einfluss auf das Eintreten einer SF. Als die am stärksten und signifikantesten einflussnehmenden Parameter stellten sich die Max. Mittl. N-Intensität, der mittlere Versiegelungsgrad, die EZG-Fläche, die N-Flächenmittelabnahme und die Max. N-Stundensumme heraus. Diese Ergebnisse überschneiden sich wesentlich mit den Ergebnissen aus der Untersuchung von Diakakis et al. (2016). Über das LR-Modell war es zudem möglich eine quantitative Einschätzung hinsichtlich nicht bekannter bzw. in der Analyse unberücksichtigter SFE in BW zu treffen. Der Anteil der unbekannten SFE an den bekannten SFE macht dabei in etwa 16 % aus, es finden hier voraussichtlich überwiegend urbane SFE Berücksichtigung. Aussagen zu SFE in unbeobachteten Gebieten zu treffen hat sich als sehr schwierig erwiesen. Die LR hat sich als sehr geeignete analytische Methode für die gewählte Anwendung herausgestellt.

Die vorliegende Arbeit ist dabei die erste Untersuchung, welche die bekannten SFE für BW in ihrer Gesamtheit analysiert und auswertet. Soweit bekannt, wird hier ebenfalls erstmalig die Niederschlagszellengröße als Einflussfaktor auf das Auftreten von SF untersucht. Die Betrachtung dieses Faktors hat durch die Relevanz im LR-Modell dabei einen großen Mehrwert für die

Untersuchung. Auf Basis der Arbeitsergebnisse konnte ein verbessertes Verständnis der Schlüsselfaktoren für das Auftreten von SF in BW erlangt und das Ziel dieser Arbeit erreicht werden. Mit Blick in die Zukunft offenbart sich dennoch ein hohes Potential für weitere Untersuchungen. Mehrfach hat sich, im Zuge der Arbeit, dabei die hohe Relevanz der Thematik und Problematik für ganz BW durch die Tatsache bestätigt, dass SF, sowie SRE mit SF-Bildungspotential landesweit auftreten. Mit Blick auf den Klimawandel ist es dahingehend von besonderem Stellenwert, den Bekanntheitsgrad dieser Naturkatastrophe weiter zu fördern und geeignete Vorsorgemaßnahmen und Risikostrategien frühzeitig anzugehen.

Literaturverzeichnis

- Backhaus, K., Erichson, B., Plinke, W., Weiber, R., 2018. *Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Bertrand, M., Liébault, F., Piégay, H., 2013. Debris-flow susceptibility of upland catchments. *Nat Hazards* 67 (2), 497–511. 10.1007/s11069-013-0575-4.
- Berz, G., Kron, W., Loster, T., Rauch, E., Schimetschek, J., Schmieder, J., Siebert, A., Smolka, A., Wirtz, A., 2001. World Map of Natural Hazards – A Global View of the Distribution and Intensity of Significant Exposures. *Natural Hazards* 23 (2/3), 443–465. 10.1023/A:1011193724026.
- Blöschl, G., Sivapalan, M., Wagener, T., Viglione, A., Savenije, H., 2013. *Runoff Prediction in Ungauged Basins. Synthesis across Processes, Places and Scales*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Borga, M., Anagnostou, E.N., Blöschl, G., Creutin, J.-D., 2010. Flash floods: Observations and analysis of hydro-meteorological controls. *Journal of Hydrology* 394 (1-2), 1–3. 10.1016/j.jhydrol.2010.07.048.
- Borga, M., Anagnostou, E.N., Blöschl, G., Creutin, J.-D., 2011. Flash flood forecasting, warning and risk management: the HYDRATE project. *Environmental Science & Policy* 14 (7), 834–844. 10.1016/j.envsci.2011.05.017.
- Borga, M., Boscolo, P., Zanon, F., Sangati, M., 2007. Hydrometeorological Analysis of the 29 August 2003 Flash Flood in the Eastern Italian Alps. *J. Hydrometeor* 8 (5), 1049–1067. 10.1175/JHM593.1.
- Borga, M., Stoffel, M., Marchi, L., Marra, F., Jakob, M., 2014. Hydrogeomorphic response to extreme rainfall in headwater systems: Flash floods and debris flows. *Journal of Hydrology* 518, 194–205. 10.1016/j.jhydrol.2014.05.022.
- Brasseur, G.P., Jacob, D., Schuck-Zöller, S. (Hrsg.), 2017. *Klimawandel in Deutschland*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Bronstert, A., Agarwal, A., Boessenkool, B., Fischer, M., Maik Heistermann, M., Köhn-Reich, L., Moran, T., Wendi, D., 2017a. Die Sturzflut von Braunsbach am 29. Mai 2016 - Entstehung, Ablauf und Schäden eines "Jahrhundertereignisses"; Teil 1: Meteorologische und hydrologische Analyse. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung / BfG*, 150–162. 10.5675/HyWa_2017,3_1.
- Bronstert, A., Bormann, H., Bürger, G., Haberlandt, U., Hattermann, F., Heistermann, M., Huang, S., Kolokotronis, V., Kundzewicz, Z.W., Menzel, L., Meon, G., Merz, B., Meuser, A., Paton, E.N., Petrow, T., 2017b. Hochwasser und Sturzfluten an Flüssen in Deutschland. In: G.P. Brasseur, D. Jacob, S. Schuck-Zöller (Hrsg.), *Klimawandel in Deutschland*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 87–101.
- Buchholz, O., Mittelstädt, R., Yörük, A., 2017. Modellgestützte Ermittlung der Gefährdung durch urbane Sturzfluten, 117–124.

- Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, 2015. Die unterschätzten Risiken „Starkregen“ und „Sturzfluten“. Ein Handbuch für Bürger und Kommunen.
- Diakakis, M., Deligiannakis, G., Pallikarakis, A., Skordoulis, M., 2016. Factors controlling the spatial distribution of flash flooding in the complex environment of a metropolitan urban area. The case of Athens 2013 flash flood event. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 18, 171–180. 10.1016/j.ijdr.2016.06.010.
- DKKV, 2017. Starkregen in Deutschland. Zugriff: 19.02.19.
- Dormann, C.F., 2017. Parametrische Statistik. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Doswell, C., 2001. Severe Convective Storms. American Meteorological Society.
- DWD, o.D.a. Integriertes Vorhersagesystem SINFONY. (Seamless INtegrated FOrecastiNg sYstem). Zugriff: 17.03.19.
- DWD, o.D.b. Warnkriterien. Zugriff: 27.02.19.
- DWD, o.D.c. Wetterlexikon. Starkregen. Zugriff: 28.02.19.
- DWD, 2016. Starkniederschläge in Deutschland. Zugriff: 19.02.19.
- DWD, 2018a. CDC-FTP-Server. Zugriff: 27.05.19.
- DWD, 2018b. Datensatzbeschreibung. Raster der Wiederkehrintervalle für Starkregen (Bemessungsniederschläge) in Deutschland (KOSTRA-DWD). Zugriff: 29.03.19.
- DWD, 2018c. Deutschlandwetter im Jahr 2018. Ein außergewöhnliches Wetterjahr mit vielen Rekorden. Zugriff: 17.06.19.
- DWD, 2018d. RADOLAN/RADVOR. Hoch aufgelöste Niederschlagsanalyse und –vorhersage auf der Basis quantitativer Radar- und Ombrometerdaten für grenzüberschreitende Flusseinzugsgebiete von Deutschland im Echtzeitbetrieb. Zugriff: 09.01.19.
- DWD, 2018e. RADOLAN-Kurzbeschreibung. Radargestützte Analysen stündlicher Niederschlagshöhen im Echtzeitbetrieb für Deutschland (RADOLAN) und Mitteleuropa (RADOLAN-ME). Zugriff: 28.02.19.
- ESRI, 2011. ArcGIS Desktop. Environmental Systems Research Institute, Redlands, CA.
- European Severe Storms Laboratory, 2018. European Severe Weather Database. ESWD. Zugriff: 24.04.19.
- Fiener, P., Neuhaus, P., Botschek, J., 2013. Long-term trends in rainfall erosivity—analysis of high resolution precipitation time series (1937–2007) from Western Germany. *Agricultural and Forest Meteorology* 171–172, 115–123. 10.1016/j.agrformet.2012.11.011.
- Fluss, R., Faraggi, D., Reiser, B., 2005. Estimation of the Youden Index and its Associated Cutoff Point. *Biom. J.* 47 (4), 458–472. 10.1002/bimj.200410135.
- Fohrer, N., Bormann, H., Miegel, K., Casper, M., Bronstert, A., Schumann, A., Weiler, M. (Hrsg.), 2016. Hydrologie. Haupt Verlag, Bern.

- Gaume, E., Bain, V., Bernardara, P., Newinger, O., Barbuc, M., Bateman, A., Blaškovičová, L., Blöschl, G., Borga, M., Dumitrescu, A., Daliakopoulos, I., Garcia, J., Irimescu, A., Kohnova, S., Koutroulis, A., Marchi, L., Matreata, S., Medina, V., Preciso, E., Sempere-Torres, D., Stancalie, G., Szolgay, J., Tsanis, I., Velasco, D., Viglione, A., 2009. A compilation of data on European flash floods. *Journal of Hydrology* 367, 70–78. 10.1016/j.jhydrol.2008.12.028.
- GDV (Hrsg.), 2015. Naturgefahrenreport 2015. Die Schaden-Chronik der deutschen Versicherer in Zahlen, Stimmen und Ereignissen.
- Gourley, J.J., Flamig, Z.L., Hong, Y., Howard, K.W., 2014. Evaluation of past, present and future tools for radar-based flash-flood prediction in the USA. *Hydrological Sciences Journal* 59 (7), 1377–1389. 10.1080/02626667.2014.919391.
- Grillakis, M.G., Koutroulis, A.G., Komma, J., Tsanis, I.K., Wagner, W., Blöschl, G., 2016. Initial soil moisture effects on flash flood generation – A comparison between basins of contrasting hydro-climatic conditions. *Journal of Hydrology* 541, 206–217. 10.1016/j.jhydrol.2016.03.007.
- Hapuarachchi, H.A.P., Wang, Q.J., Pagano, T.C., 2011. A review of advances in flash flood forecasting. *Hydrol. Process.* 25 (18), 2771–2784. 10.1002/hyp.8040.
- Hardy, J., Gourley, J., Kirstetter, P.-E., Hong, Y., Kong, F., Flamig, Z., 2016. A method for probabilistic flash flood forecasting. *Journal of Hydrology* 541, 480–494. 10.1016/j.jhydrol.2016.04.007.
- Hatzfeld, F., Castro, D., Einfalt, T., Frerichs, S., Friedeheim, K., Kubik, A., Wagner, A., 2009. Angebot. Vorhersage und Management von Sturzfluten in urbanen Gebieten (URBAS). Vorhabensbeschreibung.
- Hatzfeld, F.e.a., 2009. Vorhersage und Management von Sturzfluten in urbanen Gebieten (URBAS). Vorhabensbeschreibung. BMBF-Projekt.
- Hrachowitz, M., Savenije, H.H.G., Blöschl, G., McDonnell, J.J., Sivapalan, M., Pomeroy, J.W., Arheimer, B., Blume, T., Clark, M.P., Ehret, U., Fenicia, F., Freer, J.E., Gelfan, A., Gupta, H.V., Hughes, D.A., Hut, R.W., Montanari, A., Pande, S., Tetzlaff, D., Troch, P.A., Uhlenbrook, S., Wagener, T., Winsemius, H.C., Woods, R.A., Zehe, E., Cudennec, C., 2013. A decade of Predictions in Ungauged Basins (PUB). A review. *Hydrological Sciences Journal* 58 (6), 1198–1255. 10.1080/02626667.2013.803183.
- Huntington, T.G., 2006. Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis. *Journal of Hydrology* 319 (1-4), 83–95. 10.1016/j.jhydrol.2005.07.003.
- Hütte, M., 2000. Ökologie und Wasserbau. Ökologische Grundlagen von gewässerverbauung und Wasserkraftnutzung. Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin.
- Hydrotec et al., 2011. URBAS Ereignis-Datenbank. Förderprogramm des BMBF: Risikomanagement extremer Hochwasserereignisse; Vorhersage und Management von Sturzfluten in urbanen Gebieten. Zugriff: 24.04.19.

- IPCC (Hrsg.), 2015. Climate change 2014. Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)], Geneva, Switzerland.
- IRDR, 2011. Forensic Investigations of Disasters: The FORIN Project. Integrated Research on Disaster Risk, Beijing.
- Javelle, P., Fouchier, C., Arnaud, P., Lavabre, J., 2010. Flash flood warning at ungauged locations using radar rainfall and antecedent soil moisture estimations. *Journal of Hydrology* 394 (1-2), 267–274. 10.1016/j.jhydrol.2010.03.032.
- Jonkman, S.N., 2005. Global Perspectives on Loss of Human Life Caused by Floods. *Nat Hazards* 34 (2), 151–175. 10.1007/s11069-004-8891-3.
- Klafl, S., 2011. Kombinierte Wahrscheinlichkeiten (joint probabilities) von Starkniederschlägen und Vorfeuchtebedingungen in Baden - Württemberg. Diplomarbeit. (unveröffentlicht).
- Klose, B., 2008. Meteorologie. Eine interdisziplinäre Einführung in die Physik der Atmosphäre. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Krier, R., 2017. Einflussfaktoren auf Sturzfluten und deren Potential zur Modellierung. - Masterarbeit.
- Kron, W., 2005. Sturmfluten, Flussüberschwemmungen, Sturzfluten – Schäden und Vorsorgestrategien. *Schadenspiegel Münchener Rück* 48 (3), 8–11.
- Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW, 2010. Extremwertstatistische Untersuchung von Starkniederschlägen in NRW (ExUS) – Veränderung in Dauer, Intensität und Raum auf Basis beobachteter Ereignisse und Auswirkungen auf die Eintretenswahrscheinlichkeit. Abschlussbericht.
- LAWA, 2018. LAWA-Strategie für ein effektives Starkregenrisikomanagement, Erfurt.
- Liebscher, H.-J., Mendel, H.G., 2010. Vom empirischen Modellansatz zum komplexen hydrologischen Flussgebietsmodell. Rückblick und Perspektiven. BFG.
- LUBW, 2013. Zukünftige Klimaentwicklung in Baden-Württemberg. Perspektiven aus regionalen Klimamodellen – Langfassung.
- LUBW, 2016. Leitfaden Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg. LUBW Landesanstalt für Umwelt Messungen und Naturschutz, Karlsruhe.
- Maiwald, H., Schwarz, J., 2016. Die Sturzflut von Braunsbach – Ingenieuranalyse der Gebäudeschäden. *Bautechnik* 93 (12).
- Marchi, L., Borga, M., Preciso, E., Gaume, E., 2010. Characterisation of selected extreme flash floods in Europe and implications for flood risk management. *Journal of Hydrology* 394 (1-2), 118–133. 10.1016/j.jhydrol.2010.07.017.
- Merz, R., Blöschl, G., 2003. A process typology of regional floods. *Water Resour. Res.* 39 (12), 1065. 10.1029/2002WR001952.

- Mudersbach, C., Krüger, M., Pfister, A., Netzel, F., 2017. Starkregenindizes: Geeignete Instrumente für die Risikokommunikation in Zeiten des hydrologischen Wandels? *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* (38), 1–10.
- Mueller, E.N., Pfister, A., 2011. Increasing occurrence of high-intensity rainstorm events relevant for the generation of soil erosion in a temperate lowland region in Central Europe. *Journal of Hydrology* 411 (3-4), 266–278. 10.1016/j.jhydrol.2011.10.005.
- Müller-Westermeier, G., 2001. Das Klima in Deutschland. Klimastatusbericht. DWD.
- Munich RE (Hrsg.), 2005. Schadenspiegel. Themenheft Risikofaktot Wasser.
- Munich RE (Hrsg.), 2017. Topics Geo Naturkatastrophen 2016. Analysen, Bewertungen, Positionen.
- Munich RE (Hrsg.), 2018. Topics Geo Naturkatastrophen 2017. Analyse, Bewertungen, Positionen.
- Patt, H., Jüpner, R., 2013. Hochwasser-Handbuch. Auswirkungen und Schutz. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Pfister, A., Treis, A., Teichgräber, B., 2015. Der Einsatz von Radardaten für wasserwirtschaftliche Zwecke bei EmscherGenossenschaft und Lippeverband. *Korrespondenz Wasserwirtschaft* 8 (2), 115–124.
- Pinto, D., Castro, L., Cruzat, M.L., Barros, S., Gironás, J., Oberli, C., Torres, M., Escauriaza, C., Cipriano, A., 2015. Decision Support System for a Pilot Flash Flood Early Warning System in Central Chile. *International Journal of Social, Behavioral, Educational, Economic, Business and Industrial Engineering* 9 (3), 990–997.
- Pradhan, B., Lee, S., 2010. Delineation of landslide hazard areas on Penang Island, Malaysia, by using frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network models. *Environ Earth Sci* 60 (5), 1037–1054. 10.1007/s12665-009-0245-8.
- R Core Team, 2017. A language and environment for statistical computing, Österreich. <https://www.R-project.org/>.
- Raynaud, D., Thielen, J., Salamon, P., Burek, P., Anquetin, S., Alfieri, L., 2015. A dynamic runoff co-efficient to improve flash flood early warning in Europe: evaluation on the 2013 central European floods in Germany. *Met. Apps* 22 (3), 410–418. 10.1002/met.1469.
- Rutschmann, P. (Hrsg.), 2017. Naturgefahren - von der Sturzflut zur Schwemmholtzverklauung. Ereignisanalysen, aktuelle Forschungsvorhaben und Projekte : Beiträge zur Fachtagung am 6. Juli 2017 in Oberrach. TUM Technische Universität München Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft, München.
- Sauer, S., 2019. Moderne Datenanalyse mit R. Daten einlesen, aufbereiten, visualisieren, modellieren und kommunizieren. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
- Steinbrich, A., Stölzle, M., Weiler, M., 2016. Generierung von konsistenten Grundlagendaten zur Berechnung von Starkregenereignissen für eine Starkregenengefahrenkartierung in BW. Abschlussbericht für die LUBW zu den im Werkvertrag vereinbarten Leistungen. Professur für Hydrologie.

- Steinbrich, A., Weiler, M., Leisert, H., 2015. Alles RoGeR Modellierung von Sturzfluten aufgrund von Starkniederschlägen. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung (35.15), 1–11.
- Terti, G., Ruin, I., Anquetin, S., Gourley, J.J., 2015. Dynamic vulnerability factors for impact-based flash flood prediction. Nat Hazards 79 (3), 1481–1497. 10.1007/s11069-015-1910-8.
- Treis, A., Gernreich, J., Krüger, M., Pfister, A., 2017. GIS-gestützte Aufbereitung von Radarniederschlagsdaten in der Starkregenanalyse und deren Anwendung im Emschergebiet. AGIT Journal für Angewandte Geoinformatik (3), 266–276. 10.14627/537633029.
- Vischer, D., Huber, A., 2003. Wasserhaushalt. In: D. Vischer, A. Huber, Vischer-Huber (Hrsg.), Wasserbau. Hydrologische Grundlagen, Elemente des Wasserbaus, Nutz- und Schutzbauten an Binnengewässern. Springer, Berlin, 4–67.
- Viviroli, D., 2013. Methoden für die Hochwasserabschätzung. Beiträge zur Hydrologie der Schweiz (40), 47–50.
- 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. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung / BfG – Jahrgang: 61.2017,3 - ISSN 1439-1783, 163–175. 10.5675/HyWa_2017,3_2.
- WaBoA, 2012. Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg. Stuttgart.
- Winterrath, T., Brendel, C., Hafer, M., Junghänel, T., Klameth, A., Walawender, E., Weigl, E., Becker, A., 2017. Erstellung einer radargestützten Niederschlagsklimatologie. Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main.
- Youssef, A.M., Pradhan, B., Sefry, S.A., 2016. Flash flood susceptibility assessment in Jeddah city (Kingdom of Saudi Arabia) using bivariate and multivariate statistical models. Environ Earth Sci 75 (1), 23. 10.1007/s12665-015-4830-8.
- Ziese, M., Junghänel, T., Becker, A., 2016. Andauernde Großwetterlage Tief Mitteleuropa entfaltet Ihr Unwetterpotential mit starken Gewittern und massiven Schadensgeschehen in Deutschland. Zugriff: 06.03.19.

Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass diese Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel angefertigt wurde.

Ort, Datum

Unterschrift