

# **Analyse einer Starkregen-Datenbank – zeitliche und räumliche Schwerpunkte in Hessen**

Abschlussarbeit zur Erlangung des akademischen Grades  
Master of Science (M.Sc.) Physische Geographie

an der Johann Wolfgang Goethe-Universität, Frankfurt am Main

vorgelegt von

Phillip Engel

geb. am 02.03.1996 in Coburg

Erstgutachter: Prof. Dr. Jürgen Wunderlich, Goethe-Universität

Zweitgutachterin: Dr. Heike Hübener, HLNUG

Eingereicht: 01.09.2020



## Zusammenfassung

Überschwemmte Straßen, vollgelaufene Keller, schlammige Sturzfluten – Starkregen hinterlässt häufig große Schäden. Der Klimawandel begünstigt die Entstehung von Starkregenereignissen zusätzlich. Deshalb brauchen Städte und Gemeinden Anhaltspunkte, wie gefährdet sie gegenüber Starkregen sind, um entsprechend handeln zu können.

Diese Arbeit analysiert eine Starkregen-Datenbank mit größtenteils Einsatzdaten von Feuerwehren aus ganz Hessen. Das Ziel dieser Analyse ist es mit den vorhandenen Daten zeitliche und räumliche Schwerpunkte von Starkregenereignissen zu bestimmen. Es wird den Fragen nachgegangen, wie gut eine solche Datenbank dafür geeignet ist und ob die Ergebnisse die bisherige Forschung zu diesem Thema bestätigen oder sogar neue Erkenntnisse erlangt werden. Außerdem wird auf den Einfluss von steigender Internetnutzung der Feuerwehren und der unterschiedlichen Dokumentation von Starkregen-Einsätzen eingegangen. Mit Hilfe von Microsoft Excel und ArcGIS werden die Daten ausgewertet und Schwerpunkte von Starkregenereignissen dargestellt.

Es zeigt sich ein eindeutiger Jahresverlauf mit einem Peak im Frühsommer sowie eine interannuelle Variabilität mit Hot-Spot -und Low-Spot-Jahren. Die räumliche Analyse liefert eine recht gleichmäßige Verteilung, aber auch einige Auffälligkeiten und Besonderheiten von Gebieten in Hessen mit hoher Starkregenhäufigkeit, welche näher betrachtet werden.

## **Abstract**

Flooded streets and basements, muddy flash floods - heavy rain often causes great damage. Climate change also favors the occurrence of heavy rain events. Cities and municipalities therefore need indicators of how vulnerable they are to heavy rain in order to be able to act accordingly.

This work analyzes a heavy rain database with mostly operational data from fire brigades from all over Hesse. The aim of this analysis is to use the available data to determine the temporal and spatial focus of heavy rain events. The question of how well such a database is suitable for this purpose is investigated and whether the results confirm previous research on this topic or even gain new knowledge. In addition, the influence of increasing internet use by fire brigades and the different documentation of heavy rain operations is discussed. With the help of Microsoft Excel and ArcGIS, the data is evaluated and the focus of heavy rain events is shown.

There is a clear annual course with a peak in early summer as well as interannual variability with hot-spot and low-spot years. The spatial analysis provides a fairly even distribution, but also some abnormalities and peculiarities of areas in Hesse with a high frequency of heavy rain, which are examined more closely.

## **Persönliche Motivation und Danksagung**

Da mich schon mein gesamtes Studium (und auch davor) Umwelt- und Klimathemen sehr reizen, war für mich schon relativ früh klar, dass meine Masterarbeit eben jene Themen behandeln soll. Einen Stoß in die richtige Richtung gab mir vor allem mein Praktikum im Frühjahr 2019 im Hessischen Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (HMUKLV), wo ich lernte, wie auf regionaler und lokaler Ebene mit dem Thema Klimawandel umgegangen wird. Zudem wurde ich dort auf das Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie aufmerksam, dessen Fachzentrum Klimawandel und Anpassung mir letztlich das Masterarbeits-Thema vergab.

Mit dieser Arbeit möchte ich meinen eigenen Beitrag zum und persönlichen Abschluss des Masterstudiengangs Physische Geographie an der Goethe Universität leisten, der passenderweise das übergeordnete Thema „Mensch und Umwelt im Globalen Wandel“ trägt. Denn um das Verhältnis Mensch – Umwelt geht es auch bei der vorliegenden Masterarbeit mit dem Titel „Analyse einer Starkregen-Datenbank – zeitliche und räumliche Schwerpunkte in Hessen“.

Im Laufe der Anfertigung dieser Arbeit erhielt ich Unterstützung durch meine Betreuer im HLNUG Frau Dr. Heike Hübener und Herr Dr. Andreas Hoy sowie von universitärer Seite Herr Prof. Dr. Jürgen Wunderlich, bei denen ich mich an dieser Stelle herzlich bedanken möchte. Ebenfalls bedanken möchte ich mich für die Hilfestellungen bei den GIS-Arbeiten bei Frau Dr. Johanna Lenz (HLNUG). Trotz der mitten in der Bearbeitungszeit beginnenden Covid-19-Pandemie wurde es mir von allen Seiten ermöglicht, die Masterarbeit ohne größere Einschränkungen und ohne größeren Zeitverzug fertigzustellen. Schließlich danke ich allen mir nahestehenden Menschen dafür, dass Sie mir während des Studiums stets den Rücken stärkten und an mich und meine Ziele glaubten.

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abb. 1:</b> Auswirkungen von Starkregen im Flachland und Hügelland .....	4
<b>Abb. 2:</b> Schema der aktuellen und zukünftig erwarteten Intensitäts-Verteilung des Niederschlags.....	6
<b>Abb. 3:</b> Vergleich der höchsten in Deutschland gemessenen Tagesniederschlagshöhen während den Starkregen-Episoden in den Frühsommern 2016 und 2018.....	8
<b>Abb. 4:</b> Darstellung der Starkregenmeldungen auf Gemeindeebene in absoluten Zahlen und pro 10 km <sup>2</sup> .....	12
<b>Abb. 5:</b> Verteilung der Starkregenereignisse verschiedener Dauerstufen über die Jahre 2001-2018 in Deutschland.....	13
<b>Abb. 6:</b> Ausschnitt der Ereignisdatenbank .....	15
<b>Abb. 7:</b> Ursprüngliche Anzahl der Einträge pro Klassifikation .....	16
<b>Abb. 8:</b> „bereinigte“ Klassifikation 1.....	17
<b>Abb. 9:</b> Neuverteilung der Einträge nach Bereinigung der Klassifikation 1 .....	18
<b>Abb. 10:</b> Gemeinden in Mittel- und Nordhessen mit keinen oder nur wenigen Einträgen oben im Vergleich zu Gemeinden in Südhessen mit größtenteils mehreren Einträgen unten ...	21
<b>Abb. 11:</b> Monatliche Entwicklung aller Starkregen-Einträge .....	24
<b>Abb. 12:</b> Gegenüberstellung der monatlichen Entwicklung der Einträge aus Klassifikation 1 und aus Klassifikation 2 + 3.....	24
<b>Abb. 13:</b> Monatlicher Verlauf der "ungültigen" Einträge aus Klassifikation 1 .....	25
<b>Abb. 14:</b> Monatliche Entwicklung nach "Bereinigung" der Klassifikation 1.....	26
<b>Abb. 15:</b> Überblick über die zeitliche Entwicklung der Starkregen-Einträge und ausgewählter Zeitraum .....	27
<b>Abb. 16:</b> Unbereinigte zeitliche Entwicklung aller Einträge im ausgewählten Zeitraum .....	27
<b>Abb. 17:</b> Gegenüberstellung der Jahr-zu-Jahr-Entwicklung der Einträge aus Klassifikation 1 und Klassifikation 2 + 3.....	28

<b>Abb. 18:</b> Gegenüberstellung der "aufgeteilten" Einträge aus Klassifikation 1 .....	<b>29</b>
<b>Abb. 19:</b> Jahr-zu-Jahr-Verlauf nach der Filterung .....	<b>30</b>
<b>Abb. 20:</b> Absolute Anzahl der Starkregenereignisse in der unveränderten Klassifikation 1 .....	<b>32</b>
<b>Abb. 21:</b> Aufteilung der Klassifikation 1 in „ungültige“ Einträge und „neu zu Klassifikation 2 + 3 hinzugefügte“ .....	<b>33</b>
<b>Abb. 22:</b> Absolute Anzahl der Starkregenereignisse in der unveränderten Klassifikation 2 + 3 .....	<b>34</b>
<b>Abb. 23:</b> Bereinigte Version aller Starkregenereignisse im ausgewählten Zeitraum .....	<b>36</b>
<b>Abb. 24:</b> Die Jahre 2008 und 2015 im Vergleich .....	<b>38</b>
<b>Abb. 25:</b> Anzahl der Starkregenereignisse im Jahr 2016 .....	<b>39</b>
<b>Abb. 26:</b> Anzahl der Starkregenereignisse im Jahr 2018 .....	<b>40</b>
<b>Abb. 27:</b> Verteilung von Starkregenereignissen vom 19. - 21.05.2019.....	<b>41</b>
<b>Abb. 28:</b> Verteilung von Starkregenereignissen am 23.09.2018.....	<b>42</b>
<b>Abb. 29:</b> Absolute Anzahl der Starkregenereignisse in den Monaten Mai und Juni 2016 .....	<b>43</b>
<b>Abb. 30:</b> Lage der Gemeinde Haiger in der pro 100 000 Einwohner Darstellung des Jahres 2006.....	<b>44</b>
<b>Abb. 31:</b> Jahresverlauf von Starkregenereignissen in Südhessen im Zeitraum 1881 – 1980 ....	<b>46</b>
<b>Abb. 32:</b> Jahresgang der Tagesmaxima .....	<b>46</b>
<b>Abb. 33:</b> Jährliche Anzahl von Feuerwehreinsätzen nach Starkregen in Rhein-Main .....	<b>47</b>
<b>Abb. 34:</b> Gesamteinsätze nach Starkregen im Zeitraum 2007 - 2011 im Rhein-Main-Gebiet ...	<b>49</b>

## **Tabellenverzeichnis**

**Tab. 1:** KLIMPRAX-Klassifikation für Starkniederschlagsereignisse.....**15**

**Tab. 2:** Starkregeneinsätze nach Landkreisen.....**48**



## Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>i</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>ii</b>
<b>Persönliche Motivation und Danksagung</b> .....	<b>iii</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>iv</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>v</b>
<b>1. Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Definitionen und Grundlagen.....	2
1.2 Problemstellung .....	4
<b>2. Ziele der Arbeit</b> .....	<b>7</b>
<b>3. Forschungsstand</b> .....	<b>8</b>
<b>4. Daten und Methoden</b> .....	<b>14</b>
4.1 Die Ereignisdatenbank .....	14
4.2 Vorgehensweise/Methodik .....	16
<b>5. Vorarbeiten für die Detail-Auswertung</b> .....	<b>19</b>
<b>6. Auswertung der Starkregen-Datenbank</b> .....	<b>23</b>
6.1 Zeitliche Schwerpunkte von Starkregenereignissen .....	23
6.1.1 Jahresverlauf.....	23
6.1.2 Interannuelle Variabilität .....	26
6.2 Räumliche Schwerpunkte von Starkregenereignissen.....	31
6.2.1 Nach Klassifikationen .....	31
6.2.2 Nach Einzeljahren .....	37
6.2.3 Nach Einzelereignissen .....	41
<b>7. Diskussion und Bewertung des Datensatzes</b> .....	<b>45</b>
7.1 Vergleich der Ergebnisse mit bestehender Literatur .....	45
7.2 Problem bei Bereinigung der Klassifikation 1 .....	50

7.3 Verwendung zweier Karten-Varianten .....	51
7.4 Bewertung des Datensatzes.....	52
<b>8. Fazit und Ausblick.....</b>	<b>53</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>55</b>
<b>Anhang.....</b>	<b>57</b>

## 1. Einleitung

„Der stärkste Regen fängt mit Tropfen an.“

Deutsches Sprichwort

Wenn in den vergangenen Sommern nicht gerade die Trockenheit das bestimmende Wetter-Thema in der Medienlandschaft war, dann waren es die häufigen und schadensintensiven Starkregen-Ereignisse, die die Aufmerksamkeit von Bürgern und Politikern auf sich zogen. Es scheint, als würden diese beiden Extreme die sommerlichen Witterungsverhältnisse in Deutschland seit einigen Jahren bestimmen. Vielen noch in Erinnerung sind sicherlich die katastrophalen Sturzfluten in Braunsbach und Simbach im Frühsommer 2016. Solche Starkregen-Ereignisse nehmen auf lokaler und regionaler Ebene an Relevanz zu, auch in Hessen.

Diese Masterarbeit beschäftigt sich mit der Analyse einer Datenbank mit hessenweiten Einträgen von Starkregen-Ereignissen und zugehörigen Schadensmeldungen, die überwiegend aus Feuerwehreinsatzdaten stammen. Microsoft Excel und ArcGIS werden dafür verwendet, zeitliche und räumliche Schwerpunkte von Starkregen-Ereignissen der vergangenen Jahre herauszufinden und darzustellen. Ein Vergleich mit bestehender Literatur zu dem Thema und insbesondere mit den Ergebnissen des abgeschlossenen KLIMPRAX-Starkregen-Projekts sowie mit Wettermessdaten soll dabei helfen, die hier vorliegenden Daten und Ergebnisse kritisch zu beurteilen und auf deren Plausibilität hin zu überprüfen. Für Städte und Gemeinden könnte damit eine weitere Möglichkeit zur Verfügung gestellt werden, die eigene Starkregen-Situation abschätzen und entsprechend handeln zu können.

Begonnen wird mit einem Überblick über einige Definitionen und Grundlagen des Themas sowie der Problemstellung. Daran anschließend folgt neben der Zielsetzung dieser Arbeit, die Vorstellung bestehender Literatur und bisheriger Forschung in diesem Themenfeld. Im vierten Kapitel werden die Ereignis-Datenbank und die Methoden näher betrachtet. Nach Erklärung der getätigten Vorarbeiten stellt Kapitel Fünf die Ergebnisse der Auswertung der Starkregen-Datenbank vor, die schließlich diskutiert und bewertet werden.

## 1.1. Definitionen/Grundlagen

Starkniederschlagsereignisse können äußerst unterschiedliche Ursachen und Folgen haben. Um bei der weiteren Lektüre dieser Arbeit Missverständnissen und Verwechslungen vorzubeugen, folgen nun einige grundlegende Begriffsdefinitionen.

Im deutschen Wasserhaushaltsgesetz (WHG) findet sich unter § 72 die Erklärung, dass „Hochwasser [...] eine zeitlich begrenzte Überschwemmung von normalerweise nicht mit Wasser bedecktem Land [ist], insbesondere durch oberirdische Gewässer oder durch in Küstengebiete eindringendes Meerwasser“ (HKC 2017: 5). Wichtig hierbei ist, nach der Art der Ursache eines Hochwassers zu unterscheiden. Grundsätzlich sollten Überschwemmungen infolge von Flusshochwasser und Überschwemmungen infolge von Starkregen separat betrachtet werden.

Von Ersterem sind nur flussnahe Gebiete betroffen. Ergiebiger Dauerregen und/oder starke Schneeschmelze kann über Stunden und Tage zum Anstieg von Flusspegeln führen. Treten die Flüsse über die Ufer, ist vom Hochwasser oft ein großflächiges Gebiet betroffen. Eine Vorhersage und entsprechende Vorbereitung ist in diesem Fall normalerweise gut möglich. Denn großflächige Regengebiete lassen sich einfacher prognostizieren als kleinräumige Gewitter und der Hochwasser-Scheitelpunkt tritt den Fluss hinab erst stunden- oder gar tageverzögert auf und kann mit Hilfe von Überwachungssystemen verfolgt werden. Anders verhält es sich mit starkregenbedingten Überschwemmungen. Starkregen wird definiert als sehr große Niederschlagsintensitäten in relativ kurzer Zeit (meist nur Minuten bis Stunden) auf ein meist räumlich begrenztes Gebiet (lokal) (HKC 2017: 7). In Deutschland gelten für gewöhnlich die Warnstufen für Starkregen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) als Kriterien. So gilt eine Unwetterwarnung vor Starkregen ab 25 mm Niederschlag in 1 Stunde bzw. ab 35 mm Niederschlag in 6 Stunden. Starkregenniederschläge treten bevorzugt bei sogenannten konvektiven Niederschlagsprozessen im Sommer auf. Unter Konvektion im meteorologischen Sinne werden vertikale Luftströmungen verstanden. Eine starke Aufheizung des Untergrundes und der darüberliegenden Luftschichten sowie eine feuchtlabile Schichtung der Atmosphäre (vertikale Temperaturänderung des Luftpakets kleiner als die der Umgebungsluft) sorgen dafür, dass warmfeuchte, wenig dichte Luft aufsteigt, mit zunehmender Höhe abkühlt und der enthaltene Wasserdampf kondensiert. Die nun kältere und dichtere Luft sinkt seitlich wieder ab und beginnt sich erneut zu erwärmen und wieder aufzusteigen. Unter Umständen können bei diesem Vorgang gewaltige Gewitter entstehen (wetteronline o.J.). Wo und wann genau dies geschieht, lässt sich nur sehr schwer vorhersagen. Bestimmte Anströmrichtungen der Luftmassen aus Osten,

Südosten und Süden sind jedoch prädestiniert für das Auftreten von Starkniederschlagsereignissen (Brieber 2018: ii).

Abgesehen von direkten Schäden an beispielsweise landwirtschaftlichen Kulturen durch Schlag- und Prallwirkungen der Regentropfen, sind es insbesondere die indirekten Schäden von Starkregen wie überflutete Keller oder Straßen, die nicht unmittelbar durch sein Auftreten entstehen, sondern erst nach Akkumulation des Niederschlagswassers. Nicht nur diese Tatsache macht Starkregen gewissermaßen zu einer Besonderheit gewitterbedingter Erscheinungsformen. Dass entsprechende Untersuchungen zu Starkregen in Deutschland, aber auch international, lange Zeit kaum durchgeführt wurden, lag an der schwierigen Verfügbarkeit des dazu benötigten Datenmaterials. Erst mit Beginn der Diskussion über die Auswirkungen des Klimawandels auf Extremwetterereignisse, rückte dieser Zweig der meteorologischen und klimatologischen Gewitterforschung ins Visier der Wissenschaftler (Gudd 2003: 7). Mit zunehmender Qualität langer Datenreihen aufgrund höherer zeitlicher und räumlicher Auflösung der Daten sowie meteorologischer Modellierungen wurden in den letzten Jahren entsprechende Analysen erst möglich.

Das Ausmaß der Schäden ist abhängig von mehreren Faktoren. Neben den atmosphärischen Bedingungen vor dem Niederschlagsereignis und denen, die zum Niederschlag führen, sind auch das Relief (z.B. Reliefform und Einzugsgebiet) und die Landnutzung vor Ort (z.B. Bewirtschaftung, Siedlung oder Infrastruktur) zusammen mit der daraus resultierenden Abflussmenge ausschlaggebend. Wenn ein kaum befahrener Feldweg in einer ländlichen Gegend durch Starkregen überflutet wird, so löst das sehr wahrscheinlich keinen Feuerwehr-Einsatz aus. Anders sieht die Situation in dicht besiedelten Gebieten mit stark genutzter Infrastruktur aus. So führt eine höhere Bevölkerungsdichte zu potenziell mehr von einem Schadensereignis betroffenen Personen, ein hoher Bodenversiegelungsgrad zu verstärktem Oberflächenabfluss. Wichtig bei unversiegelten Böden ist deren Infiltrationsrate bzw. -kapazität. Sowohl gesättigte als auch staubtrockene Böden nehmen weniger Wasser auf und es fließt verstärkt an der Oberfläche ab. Dadurch kann eine schnell fließende, energiereiche Wasserwelle entstehen (Kutschker 2018: 108 f.). In flachen Gebieten kann dies zu einer Überlastung der Entwässerungssysteme führen. In Hanglagen können sich Sturzfluten formieren, die in kürzester Zeit auch Bereiche erreichen, in welchen es nicht oder kaum geregnet hat (Abb. 1). Sie verfügen aufgrund ihrer hohen Fließgeschwindigkeiten sowie ihrer erheblichen Feststofftransporte über ein enormes Zerstörungspotenzial. Durch Starkregen verursachte Überflutungen sind in unseren mittleren Breiten die am häufigsten auftretenden Überschwemmungstypen, denn sie sind nahezu überall möglich (BMBF 2008: 2)!



Abbildung 1: Auswirkungen von Starkregen im Flachland (links) und Hügelland (rechts). (BBK 2015: 31)

## 1.2. Problemstellung

Während im Bereich der Flussüberschwemmungen durch Dauerregen weitgehend abgestimmte Verfahren der Gefahren- und Risikoanalyse sowie der Darstellung in Gefahren- und Risikokarten existieren, gibt es für kleine Bäche oder abseits von Fließgewässern oft noch keine Erfassung der Gefährdung durch Oberflächenabfluss bei Starkregen (BMBF 2008: 7). Und das obwohl Starkregen mittlerweile 50 % aller Überschwemmungsschäden verursacht (HKC 2017: 7)!

Dass dringend Handlungsbedarf zur Unterstützung von Kommunen bei der Vorsorge gegen Starkregenereignisse besteht, macht auch die Tatsache deutlich, dass Starkniederschlagsereignisse in den letzten Jahren bereits zugenommen und hinsichtlich der dadurch entstandenen Schäden an Bedeutung gewonnen haben. Neueste Erkenntnisse zeigen, dass die Anzahl der Tage sehr starker Niederschläge (tägliches Niederschlags-Perzentil > 99 %) in Europa im Schnitt um ca. 45% gestiegen ist, bezogen auf Messungen der Jahre 1981 – 2013 im Vergleich zu 1951 – 1980 (Fischer & Knutti 2016: 988). In Deutschland stieg besonders im Sommerhalbjahr die Anzahl der Starkniederschlagstage mit einer hundertjährigen Wiederkehrperiode im Zeitraum 1951 – 2000 um 13% gegenüber 1901 – 1950 (Kutschker 2018: 7). Wird die räumliche Verteilung betrachtet, dann sind vor allem Teile Süddeutschlands betroffen, wo besonders die extremsten Starkniederschläge und Niederschläge kurzer Dauer von 1 bzw. 6 Stunden in den vergangenen Jahrzehnten zugenommen haben (Kooperation Kliwa 2019: 6). Auch der IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) bestätigt in seinem letzten Sachstandsbericht aus dem Jahr 2014 diese Entwicklung: „Seit ca. 1950 wurden Veränderungen vieler extremer Wetter- und Klimaereignisse beobachtet [...] darunter [...] ein Anstieg der Anzahl

von Starkniederschlagsereignissen in etlichen Regionen.“ Im Detail heißt es in dem Bericht, „[e]s gibt wahrscheinlich mehr Landgebiete, in denen die Anzahl von Starkniederschlagsereignissen gestiegen ist, als solche, in denen sie abgenommen hat. Die Häufigkeit und Intensität von Starkniederschlagsereignissen hat in Nordamerika und Europa wahrscheinlich zugenommen“ (IPCC 2014: 53). Dass diese Beobachtungen jedoch nach wie vor mit Unsicherheiten behaftet sind, wird klar, wenn bedacht wird, dass Extreme schon per Definition selten sind, was dazu führt, dass es längere Zeiträume und eine bessere räumliche und zeitliche Auflösung braucht, um langfristige Änderungen bei Extremereignissen festzustellen (Alexander 2016: 5).

Ein Blick in die Zukunft verheißt ebenfalls nichts Gutes: Global betrachtet projizieren die Klimamodelle generell eine weitere Verstärkung der Extremniederschlagsereignisse während des 21. Jahrhunderts (Pfahl et al. 2017: 1). Die Entwicklung der Niederschlagsintensität verläuft dabei gegensätzlich: Tage mit leichten Niederschlägen nehmen ab, Tage mit Starkniederschlägen nehmen zu (Abb. 2). Jedoch muss bedacht werden, dass heutige globale Klimamodelle nur begrenzt in der Lage sind, kurzzeitige Extremniederschläge korrekt darzustellen, da sie die damit verbundenen konvektiven Prozesse nicht genau lösen können (Westra et al. 2014: 548). Der IPCC geht davon aus, dass der Klimawandel extreme Niederschlagsereignisse begünstigt und diese intensiver und häufiger über den meisten Landmassen der mittleren Breiten und über feuchten tropischen Regionen auftreten können (IPCC 2014: 62). Auf regionaler Ebene existieren jedoch große Unterschiede und Unklarheiten. Die Antwort von Niederschlägen auf steigende Treibhausgaskonzentrationen ist komplex, denn viele Prozesse auf verschiedenen Maßstabsebenen bestimmen den globalen Wasserkreislauf. Es gibt Hinweise darauf, dass die Intensität von kurzzeitigem Starkregen empfindlicher gegenüber Veränderungen der lokalen Lufttemperatur ist, verglichen mit der Intensität von Regen auf Tages-Skala. Außerdem gibt es wahrscheinlich bei der künftigen Veränderungsrate von täglichem Starkniederschlag grundsätzliche Unterschiede, was die geographische Lage betrifft, es ist aber bisher nicht möglich daraus direkte Schlüsse zu ziehen (Westra et al. 2014: 548). Als Erklärung für sich verstärkende Starkregenereignisse durch den Klimawandel zieht die Wissenschaft häufig die sogenannte Clausius-Clapeyron-Gleichung heran. Demnach besitzt wärmere Luft ein höheres Wasserdampf-Fassungsvermögen, das wiederum intensivere Niederschlagsereignisse begünstigt (Fischer & Knutti 2016: 986). Untersuchungen gehen dabei derzeit von einer Zunahme der Intensität von 6 – 7 % pro Grad C° Erwärmung aus (Ban et al. 2015: 1171). Es gibt aber ebenfalls Studien, die besagen, dass konvektiver Niederschlag sogar noch viel empfindlicher auf Temperaturerhöhungen reagiert und die Clausius-Clapeyron-Rate deutlich übersteigt (Berg et al. 2013: 181). Dies wird als Super-Clausius-Clapeyron-Verstärkung bezeichnet.

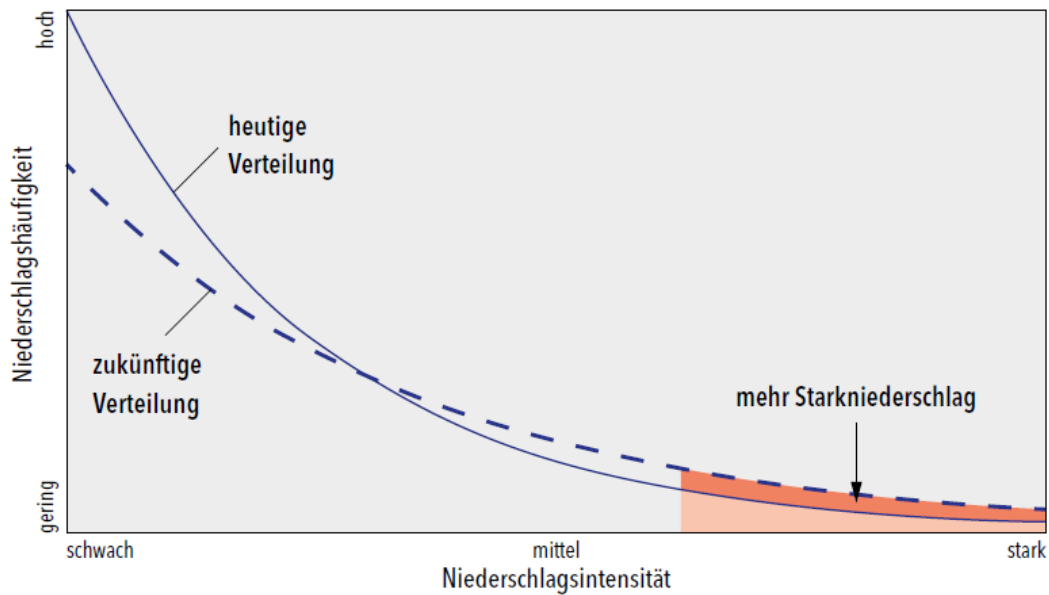


Abbildung 2: Schema der aktuellen und zukünftig erwarteten Intensitäts-Verteilung des Niederschlags (HLNUG, nach IPCC, 2020: 7)

Es wird deutlich, dass an dieser Stelle unbedingt weiterer Forschungsbedarf besteht. Starkregen stellt eine konkrete Gefahr insbesondere für bebaute Gebiete dar, der mit einer Analyse des Ist-Zustands und darauf aufbauend mit geeigneten Schutz- und Anpassungskonzepten begegnet werden muss. Dem noch immer mangelnden Risikobewusstsein vieler Bürger und Kommunen bezüglich Starkregen soll mit dieser Masterarbeit entgegengewirkt werden. Zudem soll die Erforschung von Starkniederschlagsereignissen auf lokaler bzw. regionaler Ebene für das Bundesland Hessen ergänzend zu bereits vorhandenen Untersuchungen, wie KLIMPRAX-Starkregen, vorangetrieben werden.



## 2. Ziele der Arbeit

Die Analyse der Starkregen-Datenbank zielt darauf ab, anhand der darin vorliegenden Einträge zeitliche sowie räumliche Schwerpunkte oder „Hot Spots“ von Starkregen-Ereignissen in Hessen zu finden. Gleichzeitig erfolgt eine Validierung der Ergebnisse, indem sie auf Plausibilität geprüft werden. Dies ist wichtig, um zu klären, ob die Datenbasis überhaupt für bestimmte Fragestellungen geeignet ist. Für die Auswertung dienen in erster Linie die Ergebnisse des KLIMPRAX-Starkregen-Projekts als Referenz, aber auch weitere Literatur wird verwendet. Einer besonderen Rolle kommen Wettermessdaten zu, die ebenfalls zur Überprüfung der Ergebnisse herangezogen werden. Im Laufe des Analyseprozesses und unter Berücksichtigung einer kritischen Beurteilung der Daten sollen wissenschaftliche Aussagen auf folgende Forschungsfragen getätigt werden können: „Können Feuerwehr-Einsatzdaten Starkregenereignisse räumlich und zeitlich darstellen oder spiegeln diese nur die lokale Meldehäufigkeit wider?“, „Ergeben sich signifikante Unterschiede zwischen den KLIMPRAX-Starkregen-Ergebnissen und den Ergebnissen der Auswertung der Datenbank oder decken sie sich?“, „Welche Ursachen liegen dafür vor, dass es für manche Gemeinden keine Daten gibt? Gab es dort wirklich keine Starkregenereignisse oder wurde einfach nichts gemeldet?“ oder „Finden sich weitere räumliche und/oder zeitliche Schwerpunkte als in bisherigen Untersuchungen?“.

Im besten Fall bekommen hessische Kommunen mit der ausgewerteten Datenbank ein weiteres Werkzeug an die Hand, mit dem sie den IST-Zustand der eigenen Betroffenheit durch Starkregen nutzen können, um sich auf mögliche Starkregen-Ereignisse in der Zukunft vorzubereiten. Wünschenswert wäre auch, wenn sich die Ergebnisse dieser Arbeit in bestehende Untersuchungen auf diesem Themenfeld einreihen lassen könnten – sei es durch eine Bestätigung eben jener Untersuchungen oder sogar durch neue Erkenntnisse. Außerdem könnte die hier verwendete Methodik für die weitere Auswertung der anderen Ereignisse in der Datenbank (Flächenbrände, Sturm etc.) als Grundlage genommen werden. Voraussetzung dafür bleibt jedoch, dass vorher jeweils die Belastbarkeit der Daten geprüft wird.

### 3. Forschungsstand

Da das Untersuchungsgebiet der vorliegenden Arbeit Hessen ist, erscheint es sinnvoll, den aktuellen Stand der Forschung auf nationaler und regionaler Ebene zu betrachten. Welche Untersuchungen zu Starkregenereignissen gab es in Deutschland bereits? Was sind deren Ergebnisse? Unterscheiden sie sich oder ähneln sie sich stark? Ein Fokus liegt auch auf der Frage, ob es schon ähnliche Arbeiten wie diese gibt, die sich mit Starkregen-Datenbanken auseinandersetzen?

Auf Bundesebene beschäftigt sich der KLIWA-Kurzbericht von 2019 mit den Entwicklungen von Starkniederschlägen in Vergangenheit und Zukunft. Untersucht wurden dabei kurzzeitige, ein- bis sechsstündige Starkregenereignisse, deren Prozess-Grundlagen beschrieben und der aktuelle Kenntnisstand zusammengefasst. Besonders hervorgehoben wurden in dem Bericht die Starkregen-Episoden in den Fröhsommern 2016 und 2018, die in Deutschland stark zur Sensibilisierung der Bevölkerung und der Kommunen bezüglich Starkregen beigetragen haben (Abb. 3). Mit Hinweis auf die Daten von KOSTRA-DWD konnte zudem hinsichtlich der Wiederkehrzeit verschiedener Starkniederschlagsintensitäten allgemein ein erkennbarer Nord-Süd-Gradient mit niedrigeren Werten im Norden und höheren Werten im Süden ausgemacht werden (Kooperation Kliwa 2019: 12).

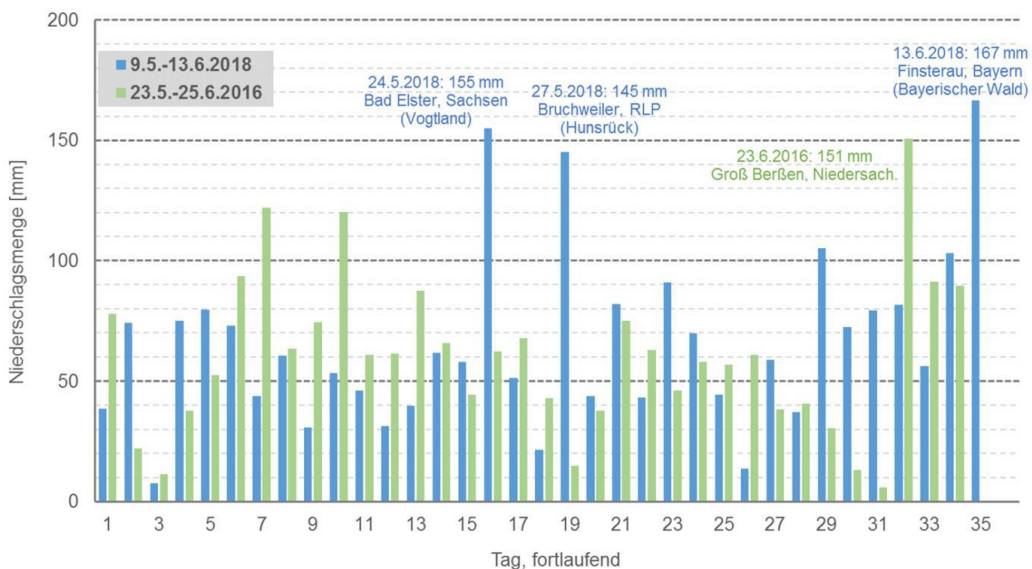


Abbildung 3: Vergleich der höchsten in Deutschland gemessenen Tagesniederschlagshöhen während den Starkregen-Episoden in den Fröhsommern 2016 und 2018 (Kooperation Kliwa 2019: 8)

2008 hat sich das Bundesministerium für Bildung und Forschung mit der Studie „Vorhersage und Management von Sturzfluten in urbanen Gebieten (URBAS)“ mit Starkregenereignissen beschäftigt. Es sollten neue Erkenntnisse zu Art, Ausprägung und Häufigkeit sowie über Schadensbilder und regionale Risikoverteilung sowie der Vorhersage von Sturzregen in besiedelten Bereichen in Deutschland erarbeitet werden, indem konvektive Niederschlagsereignisse und daraus entstandene Abflüsse erfasst wurden, die zu Schäden in bebauten Gebieten geführt haben. Die dafür entwickelte Datenbank mit 422 erfassten Ereignissen (davon 298 bzw. 71% aller Ereignisse als Sturzflutereignisse) mit Schadensfolgen in Deutschland von 1980-2007 ermöglicht einen zuverlässigen Überblick über das Auftreten dieser Ereignisse und eine Schätzung der dadurch aufgetretenen Schäden in Kommunen (BMBF 2008: 19). Der Schwerpunkt der Erfassung liegt nach der Jahrtausendwende, wobei jeweils ein Zeitraum von Mai bis September betrachtet wurde. Bei der Auswertung der Datenbank wurde festgestellt, dass vor allem Ballungsräume in NRW, Orte entlang der Rheinschiene, die Mittelgebirge und der Alpenvorraum sowie die Großstädte Hamburg, Berlin, München, Frankfurt, Stuttgart und Hannover betroffen sind. Zu beachten ist in diesem Zusammenhang jedoch, dass die meisten der genannten Gebiete von einer hohen Bevölkerungsdichte geprägt sind und deshalb die räumliche Analyse mit Vorsicht zu genießen ist. Als schadensreiche Jahre stachen 1994, 2001, 2002 und 2007 heraus. Nicht zu vernachlässigen ist zudem die Feststellung, dass bei einem Starkregenereignis im Schnitt von 6 Orten Schäden gemeldet werden (BMBF 2008: 27). Diese Ergebnisse kamen potenziell betroffenen Kommunen, Katastrophenschutzorganisationen, Wetterdiensten und ähnlichen Institutionen, (Rück-)Versicherungen sowie betroffenen Bürgern zugute.

Im vorherigen Kapitel wurde bereits erklärt, dass langjährige, zeitlich hochaufgelöste Messungen für eine genaue Einschätzung der Starkniederschläge wichtig sind. Dieser Aufgabe geht der Deutsche Wetterdienst (DWD) mit seinem aktuellen Projekt MUNSTAR („Methodische Untersuchungen zur Novellierung der Starkregenstatistik in Deutschland“) nach, das noch bis 2021 läuft und prototypische Ereignisse liefern soll (Otte 2019: 20). Die Projektergebnisse sollen anschließend auch in die KOSTRA-DWD-Rasterdaten einfließen. Die „Koordinierte Starkniederschlagsregionalisierung und -auswertung des DWD“ wird seit mehr als 30 Jahren regelmäßig erarbeitet (Deutscher Wetterdienst o.J.). Damit lassen sich Aussagen zu den Niederschlagshöhen und -spenden in Abhängigkeit von der Niederschlagsdauer und dem Wiederkehrintervall treffen.

Auf Landesebene gibt es seit 2017 vom Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie des Freistaats Sachsen eine „Analyse von Starkregenereignissen von 1961-2015 für den Freistaat Sachsen“. Der Schwerpunkt war die Analyse der Starkniederschlagsindizes R90p und R95p (die

größten 10 bzw. 5% der vorhandenen Messwerte) im genannten Zeitraum, wobei die Kerngebiete der Änderungen von Starkniederschlagsereignissen im Fokus standen. Kernergebnisse waren: Von April bis Juni abnehmende Niederschlagssummen, von Juli bis September dagegen zunehmende Niederschlagsmengen mit einem deutlich erhöhtem Starkregenanteil (Bernhofer et al 2017: 8). Die räumliche Verteilung des Starkregens zeigt einen Süd-Nord-Gradienten, der auf die Höhenabhängigkeit zurückzuführen ist und einen West-Ost-Gradienten, der die Luv-Lee-Lagen als Ursache hat (Bernhofer et al 2017: 44). Es gibt eine flächendeckende Zunahme der Tage mit Starkregenereignissen, mit den höchsten Zunahmen für 2011-2015. Die mittlere Intensität eines Starkregenereignisses nimmt dabei geringfügig zu, jedoch mit kleinräumig stärkeren Zu- und Abnahmen. Insgesamt hat sich außerdem die Änderung der Starkniederschlagscharakteristika in den letzten 5 Jahren des untersuchten Zeitraums beschleunigt (Bernhofer et al 2017: 44f.).

Auch in Hessen gab es in der Vergangenheit diverse Untersuchungen zu Starkregenereignissen. Eine davon ist die Dissertation von Martin Gudd aus dem Jahr 2003 mit dem Titel „Gewitter und Gewitterschäden im südlichen hessischen Berg- und Beckenland und im Rhein-Main-Tiefland 1881 bis 1980 - Eine Auswertung mit Hilfe von Schadensdaten“. Darin geht er für den genannten Untersuchungszeitraum der Frage nach, wie sich Schäden und Schadensereignisse räumlich und zeitlich im Untersuchungsgebiet verteilen und ob Gebiete mit einer Häufung bestimmter Schadensarten existieren. Er betrachtet dabei jeweils die Monate April bis Oktober. Die Wahl fiel auf Hessen, da dieses Bundesland ein besonders abwechslungsreiches Relief besitzt (Gudd 2003: 8). Er hat für diese Arbeit aus weit über 10 000 Einzelquellen Informationen von über 2000 Schadens- und Nichtschadensereignissen gewinnen können. Seine Datenquellen reichen dabei von gedruckten Quellen und Zeitungsberichten über ungedruckte Quellen bis hin zu meteorologischen Beobachtungstagebüchern. (Gudd 2003: 62-71). Eine Auswertung mit Hilfe von Schadensdaten hat dabei Vor- und Nachteile. Als Vorteile gelten, dass sie Verlauf und Ausmaß von Schadensgewitter- bzw. Schadensstarkregenereignissen widerspiegeln können und häufig das einzige Datenmaterial darstellen, das für vergangene und historische Ereignisse zur Verfügung steht. Andererseits haben Schadensdaten die Nachteile, dass sie sehr heterogen sind und dementsprechend die Phase der Datenerfassung sehr zeit- und kostenintensiv ist (Gudd 2003: 55). Eine Bewertung oder Klassifizierung der gewitterbedingten Starkregenereignisse erfolgt anhand der Ausprägung der beschriebenen Schäden. Da solche Kategorisierungen zur Intensitätsbestimmung reiner gewitterbedingter Starkregenereignisse im deutschsprachigen bzw. europäischen Raum zu dieser Zeit noch nicht vorlagen, orientiert er sich an Crysler et al 1980, der Schadensintensitäten von Flash Floods in der Appalachenregion der USA klassifizierte. Im Untersuchungsgebiet treten nach den Blitz- die Starkregenschäden mit 463 Ereignissen am

häufigsten auf und sind meist von geringer bis mäßiger Ausprägung. Signifikante Schäden kommen jährlich etwa einmal vor und nur etwa einmal pro Jahrzehnt nehmen die Starkregenschäden sehr starke bis katastrophale Ausmaße an (Gudd 2003: 231).

Ebenfalls für seine Dissertation befasste sich Kutschker 2018 mit den „Auswirkungen von Starkregenereignissen auf die Gefahrenabwehr im Ballungsraum Rhein-Main und mögliche Anpassungsstrategien im Bevölkerungsschutz“. Diese Arbeit ähnelt von allen bisher aufgeführten der hier vorliegenden am ehesten. Denn Kutschker hat räumliche Niederschlags- sowie Einsatzschwerpunkte der Feuerwehren analysiert. Die Einsatzdauer gibt dabei oft einen Hinweis auf das mögliche Schadensausmaß und eine Frequenz von mindestens 20 eröffneten Einsätzen innerhalb einer Stunde deutet auf die Folgen eines Niederschlagsereignisses hin. Es muss jedoch auch die Tatsache betrachtet werden, dass es immer einen Zeitverzug zwischen dem Niederschlagsereignis, dem Beginn der Überflutung, der Entdeckung der Schäden und erfolgter Notrufmeldung gibt. Allgemein ist es sinnvoll, Daten über einen möglichst großen Zeitraum zu betrachten, um eine möglichst hohe statistische Aussagekraft zu erzielen. Bei dieser, wie auch bei meiner Arbeit, wird der Untersuchungszeitraum jedoch sehr stark durch den Zeitraum der jeweiligen Datenverfügbarkeit begrenzt.

Einen besonderen Stellenwert bei der Erstellung meiner Masterarbeit, auf den später noch genauer eingegangen wird, nimmt das Projekt „Klimawandel in der Praxis – Starkregen und Katastrophenschutz in Kommunen (KLIMPRAX-Starkregen)“ unter der Leitung des HLNUG ein (Kreklow et al. 2019). Es sollen besonders von Starkregen betroffene Gebiete in Hessen identifiziert und die Kommunen bei der Prävention gegen Schäden durch Starkregen unterstützt und somit ein Starkregen-Management für Hessen aufgebaut werden. Einsatzdaten der Feuerwehr und Informationen zur Bodenerosion wurden dabei im Projektverlauf miteinander verknüpft. Das Teilprojekt 1.4 „Ausweisung von starkregengefährdeten Gebieten in Hessen für Planungen zur Gefahrenabwehr auf Landes- und kommunaler Ebene“ hatte sich als Ziel auf die Agenda gesetzt, im Projektzeitraum bis 31.12.2019 die Radarklimatologie (RADKLIM) des DWD auszuwerten und darauf aufbauend Starkregen-Hinweiskarten zu erstellen, die eine erste grobe Einschätzung der Starkregengefährdung einer Kommune oder Region in Hessen ermöglichen. Die Ergebnisse können hessische Städte und Gemeinden verwenden, um Maßnahmen zur Verringerung von Schäden durch Starkregen zu planen. Dafür wurde eine Starkregenrecherche vorgenommen, die insgesamt 178 potenzielle Starkregenereignisse verteilt über 239 der 426 Gemeinden im Zeitraum 2001 – 2016 umfasst. Es zeigte sich eine interannuelle Variabilität der Starkniederschlagshäufigkeit und eine deutliche Starkregensaison von Mai bis August (Kreklow et al. 2019: 18). Die erstellte Datenbank und die Starkregen-Hinweiskarten geben eine gute qualitative und landesweite Übersicht über Gebiete Hessens mit erhöhtem Auftreten von

Starkregen und dessen Auswirkungen im Zeitraum 2001-2016. Die Kartendarstellungen in dieser Arbeit orientieren sich an jenen im Abschlussbericht des KLIMPRAX-Starkregen-Teilprojekts (Abb. 4).

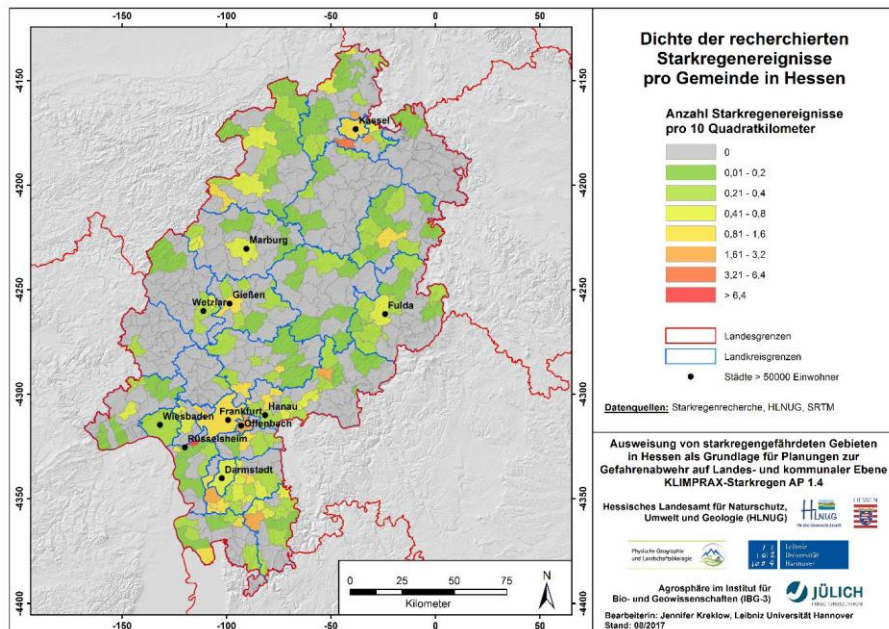
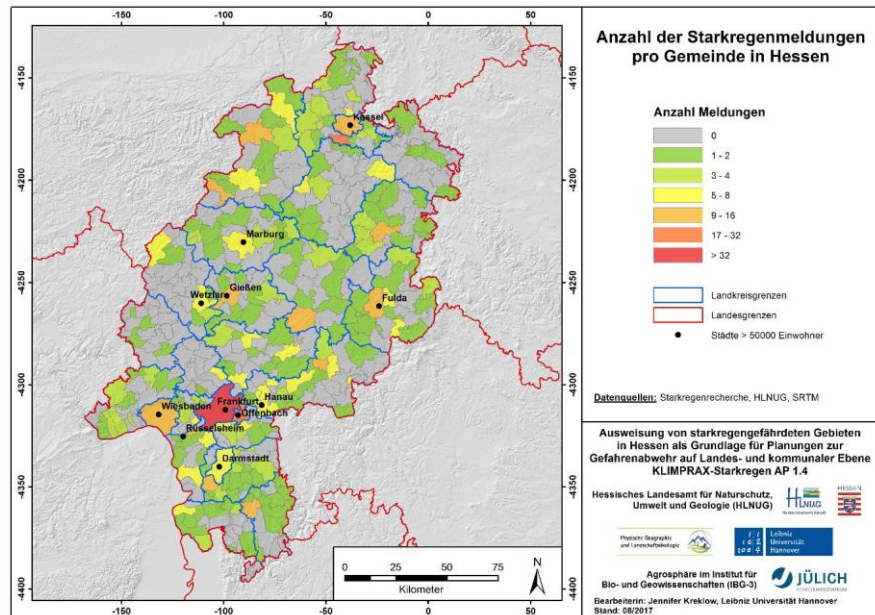


Abbildung 4: Darstellung der Starkregenmeldungen auf Gemeindeebene in absoluten Zahlen und pro 10 km<sup>2</sup> (Kreklow et al. 2019)

Auf die Radarklimatologie soll an dieser Stelle noch genauer eingegangen werden. RADKLIM schafft als radargestützte, hochaufgelöste Niederschlagsklimatologie von 2001 bis heute die Grundlage für die Analyse extremer Niederschläge in Deutschland. Kurzzeitige und kleinräumige Niederschläge können vom Stationsmessnetz des DWD oft nicht erfasst werden, weil der räumliche Abstand zwischen den Stationen zu groß ist und der Regen auch zwischen den Stationen fällt. Der flächendeckende Niederschlagsdatensatz der Radarklimatologie ändert diese Situation, denn nun ist es erstmals möglich, auch solche kleinräumigen Niederschläge umfassend für den Zeitraum 2001 – 2018 zu erfassen (Lengfeld et al. 2020: 13). In dem Datensatz von 18 Jahren sticht vor allem 2018 heraus als Jahr mit besonders vielen kurzen Starkregenereignissen (Abb. 5).

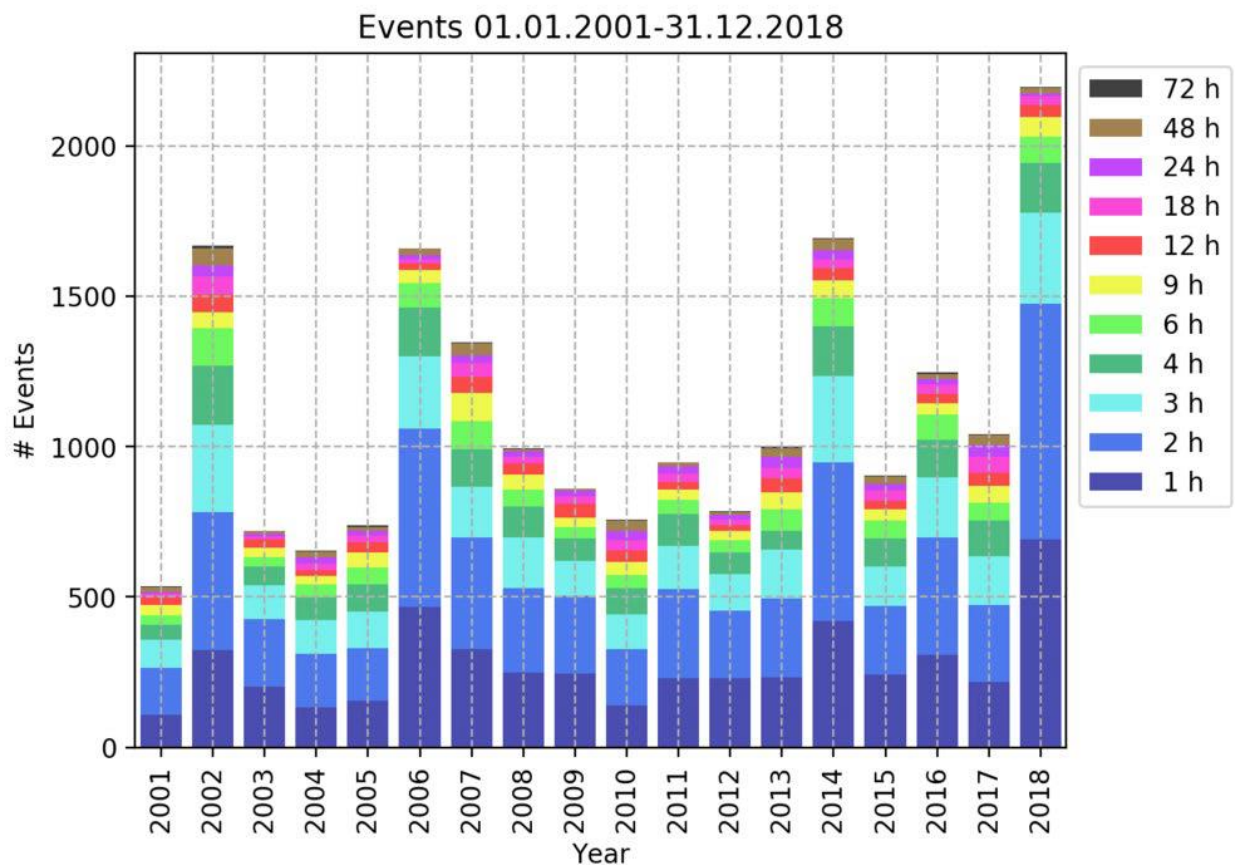


Abbildung 5: Verteilung der Starkregenereignisse verschiedener Dauerstufen über die Jahre 2001 – 2018 in Deutschland (Lengfeld et al. 2020: 16)

## **4. Daten und Methoden**

In diesem Kapitel wird die Datengrundlage der Masterarbeit, also die Ereignisdatenbank, näher vorgestellt. Zudem gibt es einen Überblick über die Vorgehensweise bei der Erstellung der Arbeit und die genutzten Methoden.

### **4.1 Die Ereignisdatenbank**

Ereignisdatenbanken sind im Allgemeinen eine gute Möglichkeit, die Auswirkungen möglicher Klimaänderungen auf Extremereignisse besser abschätzen zu können sowie das zeitliche und räumliche Schadenspotenzial von diesen in einer Region zu ermitteln (Gudd 2003: 16). Vor allem für die Klimafolgenforschung und -anpassung sind flächenhaft differenzierte, regionale Analysen, die durch solche Ereignisdatenbanken ermöglicht werden, von besonderem Interesse. Die hier vorliegende Datenbank wurde von 2016 bis Anfang 2020 von vier Praktikant\*innen im HLNUG entwickelt. Die Daten stammen zum Großteil aus den Archiven von Feuerwehreinsätzen. Anders als Kutschker, der selber bei der Feuerwehr Offenbach angestellt war und somit Zugriff auf direkte Einsatzdaten hatte, bestand diese Möglichkeit der Datenbeschaffung aus Datenschutzgründen nicht und es musste auf Online-Archive mit häufig schlechterer Qualität der Einsatzdaten zurückgegriffen werden. Dafür wurden die jeweiligen Websites oder Facebook-Einträge durchforstet. Weitere Datenquellen sind Presseberichte, eine Unwetterdatenbank und die Gemeindebefragung im Rahmen des KLIMPRAX-Starkregen-Projekts. Die Datenbank beinhaltet alle hessischen Landkreise mit ihren Gemeinden, wobei die ältesten Einträge bis zur Jahrtausendwende zurückreichen, einige wenige sogar noch weiter, die neuesten Einträge sind sehr aktuell von 2019. Sie kann als Unikat bezeichnet werden, denn sie gab es in der Art bisher noch nicht. Diese Abschlussarbeit kann als erster Versuch gesehen werden, die Datenbank auszuwerten. Der Fokus liegt dabei auf dem Starkregen-Teil mit insgesamt 3860 Einträgen (Abb. 6). Die weiteren Ereignisse „Hochwasser“, „Sturmereignis“, „Flächenbrände“ und „sonstige Ereignisse“ wie Insekteneinsatz oder Blitzschlag, die ebenfalls in der Datenbank gelistet sind, werden für diese Untersuchung außen vor gelassen. Die Starkregenereignisse wurden beim Eintragen in die Datenbank auch bereits klassifiziert, wobei die KLIMPRAX-Klassifikation zur Orientierung diente (Tab. 1).



	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Nummer	Landkreis	Stadt/Gemeinde	Datum	Informationen	Klassifikation	Quellen	Quellentyp
2	1	Bergstraße	Absteinach	04.12.2011	starker Regen: Wasser im Keller	2	https://www	Feuerwehr
3	2	Bergstraße	Absteinach	13.01.2011	starker Regen: Wasser im Keller	2	https://www	Feuerwehr
4	3	Bergstraße	Absteinach	09.06.2007	starker Regen: Wasser im Keller	2	https://www	Feuerwehr
5	4	Bergstraße	Absteinach	07.07.2006	starker Regen: Wasser im Keller	2	https://www	Feuerwehr
6	5	Bergstraße	Bensheim	28.07.2019	Überlaufendes Rückhaltebecken	2	http://www	Feuerwehr
7	6	Bergstraße	Bensheim	29.11.2018	Wasser in Keller	1	https://www	Feuerwehr
8	7	Bergstraße	Bensheim	23.09.2018	Wasser in Keller, etliche Sturmursätze	2	https://www	Feuerwehr
9	8	Bergstraße	Bensheim	11.06.2018	Starkregen, Wasser in Kellern	2	https://www	Feuerwehr
10	9	Bergstraße	Bensheim	04.06.2016	9 Wassereinsätze	2	https://www	Feuerwehr
11	10	Bergstraße	Bensheim	30.05.2016	6 Wassereinsätze	2	https://www	Feuerwehr
12	11	Bergstraße	Bensheim	06.05.2016	Wassereinsatz	1	https://www	Feuerwehr
13	12	Bergstraße	Bensheim	12.08.2015	Wasser in Keller	1	http://www	Feuerwehr
14	13	Bergstraße	Bensheim	27.06.2015	Sand und Kies auf Straße	2	http://www	Feuerwehr
15	14	Bergstraße	Bensheim	06.03.2015	Wasser in Keller	1	https://www	Feuerwehr
16	15	Bergstraße	Bensheim	05.01.2015	Wasser in Keller	1	http://www	Feuerwehr
17	16	Bergstraße	Bensheim	10.08.2014	Unwettereinsätze	3	https://www	Feuerwehr
18	17	Bergstraße	Bensheim	29.07.2014	2 Wasser- & 3 Unwettereinsätze	2	https://www	Feuerwehr
19	18	Bergstraße	Bensheim	26.07.2014	Wassereinsatz	1	http://www	Feuerwehr
20	19	Bergstraße	Bensheim	08.05.2014	Wassereinsatz	2	http://www	Feuerwehr
21	20	Bergstraße	Bensheim	22.03.2014	Wassereinsatz	1	http://www	Feuerwehr
22	21	Bergstraße	Bensheim	08.06.2013	überflutete Keller & Straßen	2	https://www	Feuerwehr
23	22	Bergstraße	Bensheim	01.06.2013	überflutete Keller, Hangrutsche	2	https://www	Feuerwehr
24	23	Bergstraße	Bensheim	31.05.2013	ste Straßen, Keller & Plätze geflutet, Hangrutsche, Bach	2	https://www	Feuerwehr
25	24	Bergstraße	Bensheim	03.11.2012	Wassereinsatz	1	https://www	Feuerwehr
26	25	Bergstraße	Bensheim	29.06.2012	4 Wassereinsätze	2	https://www	Feuerwehr

Abbildung 6: Ausschnitt der Ereignisdatenbank

Tabelle 1: KLIMPRAX-Klassifikation für Starkniederschlagsereignisse (Kreklow et al. 2019: 16)

Klasse	Bedeutung	Kriterien
1	Indikator für Starkniederschlagsereignis	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Meldungen von Wetterphänomenen, die von Starkregen begleitet oder verursacht werden können, z. B. Blitzschlag, Orkan, Windhose, Unwetter oder Wasser im Keller</li> <li>- einzelne Meldung Starkregen, Hochwasser oder vollgelaufene Keller aus Quelle fragwürdiger Seriosität, z. B. Unwetterdatenbank</li> <li>- Starkregenmeldungen der KLIMPRAX-Befragung mit Erfahrungsbewertungen (Feld a01) der Klassen 1 und 2 oder ohne konkrete Beschreibung des Ereignisses</li> </ul>
2	Starkniederschlagsereignis, lokal oder mit geringfügigen Schäden	<ul style="list-style-type: none"> <li>- einzelne Berichte von starkregenbedingten Feuerwehreinsätzen oder Schäden</li> <li>- mehrere Berichte von Starkregen ohne Hinweis auf nennenswerte Schäden oder Feuerwehreinsätze</li> <li>- Starkregenmeldungen der Befragung mit Erfahrungsbewertungen der Klassen 3 bis 5</li> </ul>
3	Starkniederschlagsereignis, großräumig oder mit großen Schäden	<ul style="list-style-type: none"> <li>- mehrere Berichte von Starkregen und Indikatoren am gleichen Tag mit mehreren Feuerwehreinsätzen und Schäden</li> <li>- Meldungen der Befragung mit Erfahrungsbewertungen der Klassen 3 bis 5 mit Hinweis auf besonders intensiven Starkregen oder besonders hohe Schäden</li> </ul>

## 4.2 Vorgehensweise/Methodik

Welche Schritte im Detail getätigt werden mussten und welche Methoden dafür angewandt wurden, um die Ziele dieser Abschlussarbeit zu erreichen, soll nun thematisiert werden.

Zunächst musste die Datenbank fertiggestellt werden, um mit ihr überhaupt arbeiten zu können. Bei der Ergänzung noch fehlender Daten konnte gleich zu Beginn ein Gefühl für die Datenherkunft erlangt werden. Die Vorarbeiten lieferten bereits erste Ergebnisse und gleichzeitig musste mit Schwierigkeiten bei der Recherche und Erstellung der Datenbank umgegangen werden. Für eine möglichst präzise Auswertung der Datenbankeinträge wurde eine Strategie überlegt, wie mit der Klassifikation der Starkregenereignisse umgegangen werden soll. Diese wird nachfolgend detailliert dargelegt:

Von den insgesamt 3860 Einträgen in der Starkregen-Datenbank sind 3576 klassifiziert. Davon gehören ca. 50% zur Klassifikation 2 oder 3 (Abb. 7). Auf diese wird der Fokus gelegt, da die Einträge mit hoher Wahrscheinlichkeit tatsächlich Starkregenereignisse widerspiegeln. Die andere Hälfte der Einträge in der Starkregen-Datenbank wurde in Klassifikation 1 eingeordnet, sodass bei diesen nicht mit Sicherheit davon ausgegangen werden kann, ob sie wirklich Starkregenereignisse zeigen. Möglicherweise bedeutet ein Eintrag „Wasser im Keller“ ein gebrochenes Rohr oder Schneeschmelze in Verbindung mit Dauerregen ist dafür verantwortlich, was aus dem Feuerwehr-Einsatzbericht nicht eindeutig herauszulesen ist. Da schon ein beträchtlicher Teil (1777 Einträge) zu Klassifikation 1 gehört, wäre es aus wissenschaftlicher Sicht nicht angebracht, diesen einfach zu ignorieren und als „ungültig“ abzustempeln. Die Frage lautet, wie nun damit umgegangen wird?

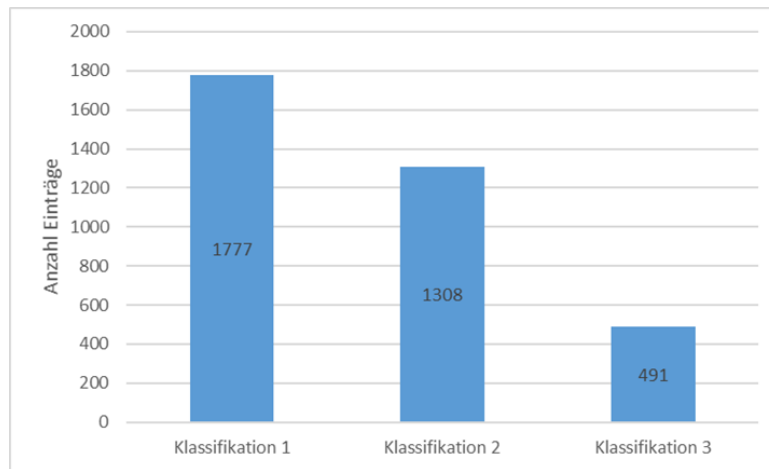


Abbildung 7: Ursprüngliche Anzahl der Einträge pro Klassifikation

Folgende Strategie erwies sich als zielführend und wurde in Microsoft Excel umgesetzt: Die Einträge aus Klassifikation 1 und aus Klassifikation 2 + 3 zusammen wurden gegenübergestellt. In Klassifikation 1 wurde dann nach Einträgen gesucht, die an mindestens 2 (verschiedenen) Orten am selben Datum gelistet sind. War dies der Fall, wurde kontrolliert, ob jenes Datum auch in Klassifikation 2 bzw. 3 eingetragen ist. Wenn auch dem so war, dann konnte mit großer Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, dass hier ein Starkregenereignis vorlag, welches fälschlicherweise in Klassifikation 1 eingeordnet wurde. Hin und wieder kam es außerdem vor, dass ein gelistetes Datum eines Eintrags in Klassifikation 1 gehäuft vorkam, in Klassifikation 2 + 3 dagegen überhaupt nicht. Auch in diesem Fall kann hier ziemlich sicher von einem Starkregenereignis geredet werden, da es relativ unwahrscheinlich ist, dass beispielsweise an gleich mehreren Orten am selben Datum Wasserrohrbrüche oder andere Ereignisse, die nicht unter die Kategorie „Starkregen“ fallen, für überflutete Keller verantwortlich sind. In die erste Variante fallen ganze 789 Einträge der Klassifikation 1, in die zweite Variante immerhin noch 223 Einträge (Abb. 8). Somit veränderte sich das Verhältnis der Klassifikationen zueinander. Klassifikation 1 schrumpfte auf 740 Einträge, welche jetzt tatsächlich als „ungültig“ angesehen werden können. Klassifikation 2 + 3 zusammen wuchsen auf 2811 Einträge an (Abb. 9). Eine Besonderheit bilden 259 Einträge (darunter 25 der Klassifikation 1 und 234 der Klassifikation 2 + 3) in der Starkregen-Datenbank, die nur mit einer Monats- und Jahresangabe versehen sind und nicht wie der Rest auf den Tag genau zurückdatiert werden können. Diese stammen aus der KLIMPRAX-Gemeindebefragung. Diejenigen der Klassifikation 2 + 3 werden für die Analysen ebenfalls berücksichtigt.

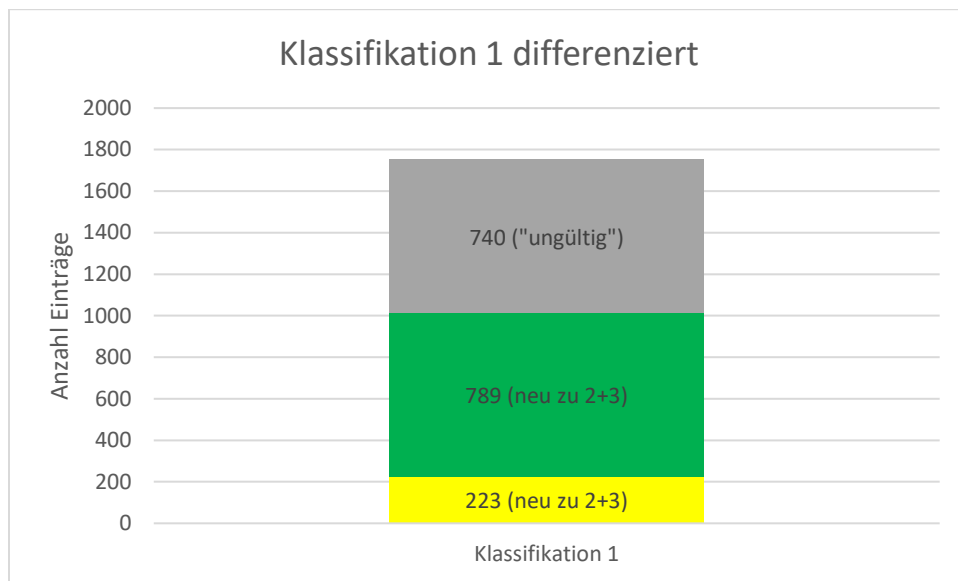


Abbildung 8: „bereinigte“ Klassifikation 1

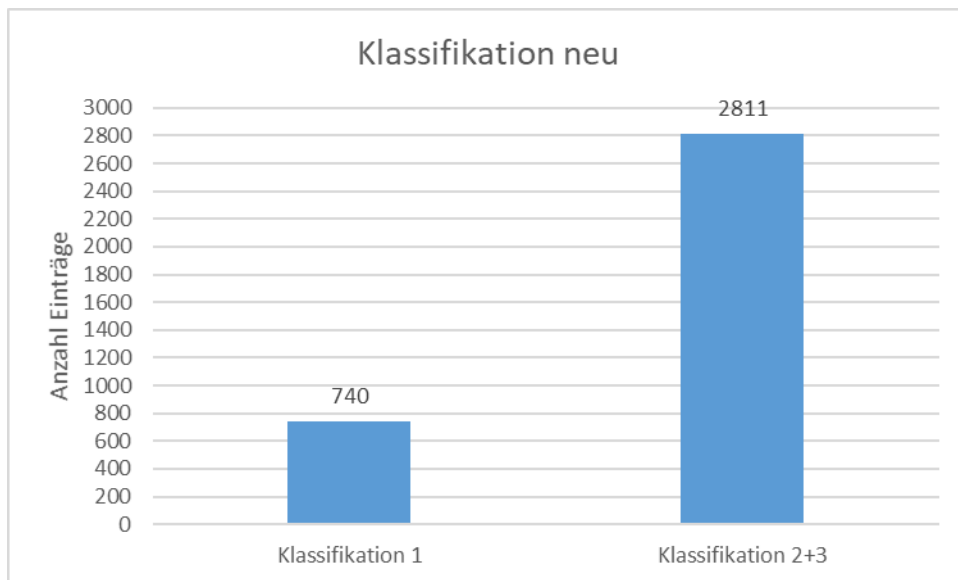


Abbildung 9: Neuverteilung der Einträge nach Bereinigung der Klassifikation 1

Aus der obigen Vorgehensweise ergaben sich fünf Klassifikationseinteilungen, mit denen in Form von Tabellen gearbeitet wurde. Zunächst wurde mithilfe einfacher Excel-Werkzeuge die zeitliche Auswertung angegangen und visualisiert. Nützliche Excel-Formeln waren dabei die „=ZÄHLENWENN“, „=FARBE“, „=Monat“ und „=JAHR“.

Die anschließende räumliche Schwerpunktanalyse wurde mit Unterstützung eines Geographischen Informationssystems (GIS) durchgeführt. Als Erstes wurden dafür die fünf Tabellen entsprechend für das Einlesen in ArcGIS aufbereitet. Das heißt alle unnötigen Angaben

wurden entfernt, sodass nur noch die Angaben für „Landkreis“, „Gemeinde“, „Datum“ und „Gemeindenummer“ übrig blieben. Im nächsten Schritt der räumlichen Datenvisualisierung wurde die jeweilige Excel-Tabelle zu ArcMap hinzugefügt, ebenfalls hinzugefügt wurde aus dem ArcCatalog der Gemeinde-Layer und Kreis-Layer, die aus dem ALKIS (Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem) stammen. In der Excel-Tabelle wurde nun die „Summarize“-Funktion angewandt, um herauszufinden, wie viele Ereignisse es pro Gemeinde(nummer) gibt. Es folgte eine stichprobenartige Kontrolle der Ergebnisse mit der ZÄHLENWENN-Formel in Excel. Mit „Join attributes from a table“ wurde der Gemeinde-Layer mit der Summarize-Tabelle anhand dem gemeinsamen Bindeglied „Gemeindenummer“ verbunden. Die dadurch entstandene Tabelle wurde als Shapefile gespeichert und ergab den gewünschten Ziel-Layer, der nun nur noch bezüglich der Skalierung angepasst werden musste. Dieses Prozedere wurde für jedes Jahr im ausgewählten Zeitraum durchgeführt. Damit ein Vergleich der Jahre untereinander möglich wird, wurde jeweils eine gleiche Skalierung gewählt. Es entstanden zwei Kartenvarianten, die für diese Arbeit von Interesse sind: Jene mit absoluten Zahlen, die konkrete Informationen über die Anzahl von Starkregen-Ereignissen für jede Gemeinde im jeweiligen Jahr bereitstellen. Und jene, die die Ereignisse pro 100 000 Einwohner darstellen, die einen „bereinigten“ Vergleich der Jahre ermöglichen. Für diese wurde eine Excel-Tabelle mit der Bevölkerungszahl pro Gemeinde vom Hessischen Statistischen Bundesamt in ArcMap eingelesen und zunächst wie gehabt vorgegangen. Die Tabelle mit den Bevölkerungsangaben wurde mit der Summarize-Tabelle verbunden, darin eine neue Spalte eingefügt und mit dem „Field Calculator“ und der Eingabe „Ereignisanzahl \* 100 000 / Bevölkerungsanzahl“ die Ereignisse pro 100 000 Einwohner pro Gemeinde berechnet. Die Ergebnis-Tabelle wurde wieder mit dem Gemeinde-Layer verbunden und wie gewohnt fortgefahren.

Bei der späteren Auswertung der räumlichen Analyse wurden die Auffälligkeiten der Ergebnisse anhand von Wettermesswerten verifiziert. Dabei half das Wetterextreme-Portal des HLNUG, das ca. 50 Klimastationen und ca. 300 Niederschlagsstationen in Hessen und der näheren Umgebung enthält. Als Datengrundlage der Klima- und Niederschlagsstationen dienen die Messungen der Wetterstationen des Deutschen Wetterdienstes. Zusätzlich werden ca. 30 Niederschlagsstationen aus dem hessischen Landesmessnetz, das vom HLNUG betrieben wird, verwendet. Besonders für die Verifikation der Einzelereignisse eignete sich das Archiv von Messwerten und Klimadaten der Kachelmann GmbH (kachelmannwetter), ebenfalls mit Daten des DWD.

## **5. Vorarbeiten für die Detail-Auswertung**

Um mit der Datenbank vernünftig arbeiten zu können, setzt voraus, dass diese auch vollständig fertiggestellt wurde. Daher bestand die erste Aufgabe darin, die Fertigstellung abzuschließen. Dies geschah zusammen mit dem Praktikanten Maximilian Og, dessen Praktikumsbericht die nun folgenden Erkenntnisse zumindest teilweise ebenfalls erhält (Og 2020). Zunächst wurde versucht, die Datenlage für Gemeinden mit bisher keinen oder nur wenigen Daten zu verbessern. Da die Datenbank im Laufe mehrerer Jahre entstanden ist, konnten so zum Beispiel für Einträge aus dem Anfangsstadium aktualisierte Daten von 2018 und 2019 hinzugefügt werden. Die neuen Einträge führten so nicht nur zu einer Quantitäts- sondern auch zu einer Qualitätssteigerung der Starkregen-Datenbank. Als eine der ersten Auffälligkeiten bei der näheren Beschäftigung mit der Datenbank stieß ein gewisses Nord-Süd-Gefälle bei der Anzahl von Ereignissen pro Landkreis bzw. Gemeinde ins Auge (Abb. 10). Während es in Mittel- und Nordhessen viele Gemeinden mit keinen oder nur wenigen Starkregen-Einträgen gibt, ist das im Rhein-Main-Gebiet bzw. Regierungsbezirk Darmstadt nur selten der Fall. Dort finden sich für die meisten Gemeinden oft mehrere Einträge in der Datenbank.

Ein weiterer Teil der Vorarbeiten bestand darin, die Starkregen-Datenbank formal einheitlich zu gestalten und für die späteren Analysen aufzubereiten. Die Erarbeitung der Datenbank durch mehrere Personen zu unterschiedlichen Zeiten hatte zur Folge, dass sich die Datensätze immer etwas unterschieden, denn mal fehlte die Nummerierung, mal die Klassifikation usw. Eine einheitliche Formatierung sollte die weitere Arbeit mit der Datenbank vereinfachen. Zudem erfolgte die Einordnung der jeweiligen Ereignisse in die Klassifikation nach Gefühl, sodass davon ausgegangen werden muss, dass zwar die Klassifikation zum Großteil richtig sein sollte, eine geringe Fehlerquote aber wahrscheinlich ist. Dieses „Rauschen“ ist jedoch vernachlässigbar. Eine abschließende Überprüfung aller Einträge mitsamt Klassifikation anhand der Quellen durch eine einzige Person wäre mit einem äußerst hohen zeitlichen (Zusatz-)Aufwand verbunden gewesen, der als nicht notwendig erschien.

Vogelsbergkreis	Gießen	Lahn-Dill-Kreis	Landkreis Marburg-Biedenkopf	Landkreis Limburg-Weilburg	Landkreis Kassel	Landkreis Fulda	Schwalm-Eder-Kreis	Landkreis Hersfeld-R
Alsfeld	Allendorf (Lumda)	Aßlar	Amöneburg	Bad Camberg	Ahnatal	Bad Salzschlirf	Bad Zwesten	Bad Hersfeld
Grebenaue	Gießen	Braunfels	Angelburg	Hadamar	Bad Emstal	Burghaun	Borken	Bebra
Herbstein	Grünberg	Dillenburg	Bad Endbach	Limburg	Bad Karlshafen	Dipperz	Edermünde	Heringen
Homburg	Hungen	Haiger	Biedenkopf	Runkel	Baunatal	Ebersburg	Felsberg	Rotenburg
Kirtorf	Laubach	Herborn	Breidenbach	Weilburg	Breuna	Ehrenberg	Frielandorf	Alheim
Lauterbach	Lich	Leun	Cölbe	Beselich	Calden	Eichenzell	Fritzlar	Breitenbach am Herz
Romrod	Linden	Solms	Dautphetal	Brechen	Espenau	Eiterfeld	Gilsberg	Cornberg
Schlitz	Lollar	Wetzlar	Ebsdorfergrund	Dornburg	Fuldabrück	Flieden	Gudensberg	Friedewald
Schotten	Pohlheim	Bischoffen	Fronhausen (Lahn)	Elbtal	Fuldatal	Fulda	Guxhagen	Hauneck
Ulrichstein	Staufenberg	Breitscheid	Gladenbach	Elz	Grebenstein	Gersfeld	Hornberg	Haunetal
Antrifttal	Biebertal	Dietzhöltal	Kirchhain	Hünfelden	Habichtswald	Großenlüder	Jesberg	Hohenroda
Feldatal	Buseck	Driedorf	Lahntal	Löhnberg	Helsa	Hilders	Knüllwald	Kirchheim
Freiensteinau	Fernwald	Ehringshausen	Lohra	Mengerskirchen	Hofgeismar	Hofbieber	Körle	Ludwigau
Gemünden	Heuchelheim	Eschenburg	Marburg	Merenberg	Immenhausen	Hosenfeld	Malsfeld	Nentershausen
Grebenhain	Langgöns	Greifenstein	Münchhausen	Selters (Taunus)	Kaufungen	Hünfeld	Melsungen	Neuenstein
Lautertal	Rabenua	Hohenahr	Neustadt (Hessen)	Villmar	Liebenau	Kalbach	Morschen	Niederaula
Mücke	Reiskirchen	Hüttenberg	Rauschenberg	Waldbrunn (Westerwald)	Lohfelden	Künzell	Neuental	Philippsthal
Schwalmtal	Wettenberg	Lahnau	Stadtallendorf	Weilmünster	Naumburg	Neuhof	Neukirchen	Ronshausen
Wartenberg		Mittenaar	Steffenberg	Weinbach	Nieste	Nüsttal	Niederstein	Schenkklengsfeld
		Schöffengrund	Weimar (Lahn)		Niestetal	Petersberg	Oberaula	Wildeck
		Siegbach	Wetter (Hessen)		Oberweser	Poppenhausen	Ottrau	
		Sinn	Wohratal		Reinhardshagen	Rasdorf	Schrecksbach	
		Waldsolms			Schauenburg	Tann	Schwalmstadt	
					Söhwald		Schwarzenborn	
					Trendelburg		Spangenberg	
					Vellmar		Wabern	
					Wahlsburg		Willingshausen	
					Wolfhagen			
					Zierenberg			

Bergstraße	Darmstadt-Dieburg	Groß-Gerau	Hochtaunuskreis	Main-Kinzig-Kreis	Main-Taunus-Kreis	Odenwaldkreis	Offenbach	Rheingau-Taunus-Kreis
Absteinach	Alsbach-Hähnlein	Biebesheim	Bad Homburg von der Höhe	Bad Orb	Bad Soden	Bad König	Dietzenbach	Aarbergen
Bensheim	Babenhausen	Bischofsheim	Friedrichsdorf	Bad Soden-Salmünster	Eppstein	Brensbach	Dreieich	Bad Schwalbach
Biblis	Bickenbach	Büttelborn	Glashütten	Biebergемünd	Eschborn	Breuberg	Egelsbach	Eltville
Birkenau	Dieburg	Gernsheim	Grävenwiesbach	Birstein	Flörsheim	Brombachtal	Hainburg	Geisenheim
Bürstadt	Eppertshausen	Ginsheim-Gustavsburg	Königstein im Taunus	Brachtal	Hattersheim	Erbach	Heusenstamm	Heidenrod
Einhausen	Erzhausen	Groß-Gerau	Kronberg im Taunus	Bruchköbel	Hochheim	Fränkisch-Crumbach	Langen	Hohenstein
Fürth	Fischbachtal	Kelsterbach	Neu-Anspach	Erlensee	Hofheim	Höchst im Odenwald	Mainhausen	Hünstetten
Gorxheimertal	Griesheim	Mörfelden-Walldorf	Oberursel	Flörsbachtal	Kelkheim	Lützelbach	Mühlheim	Idstein
Grasellenbach	Groß-Bieberau	Nauheim	Schmitten	Freigericht	Kriftel	Michelstadt	Neu-Isenburg	Kiedrich
Groß-Rohrheim	Groß-Umstadt	Raunheim	Steinbach im Taunus	Gelnhausen	Liederbach	Mossautal	Obertshausen	Lorch
Heppenheim	Groß-Zimmern	Riedstadt	Usingen	Großkrotzenburg	Schwalbach	Oberzent	Rodgau	Niedernhausen
Hirschhorn	Messel	Rüsselsheim	Wehrheim	Gründau	Sulzbach	Reichelsheim	Rödermark	Oestrich-Winkel
Lampertheim	Modautal	Stockstadt	Weilrod	Hammersbach			Seligenstadt	Rüdesheim am Rhein
Lautertal	Mühltal	Trebur		Hanau				Schlangenberg
Lindenfels	Münster (Hessen)			Hasselroth				Taunusstein
Lorsch	Ober-Ramstadt			Jossgrund				Waldems
Mörlenbach	Otzberg			Langenselbold				Walluf
Neckarsteinach	Pfungstadt			Linsengericht				
Rimbach	Reinheim			Maintal				
Viernheim	Roßdorf			Neuberg				
Wald-Michelbach	Schaafheim			Nidderau				
Zwingenberg	Seeheim-Jugenheim			Niederdorfelden				
	Weiterstadt			Rodenbach				
				Ronneburg				
				Schöneck				
				Schlüchtern				
				Sinntal				
				Steinau an der Straße				
				Wächtersbach				

Abbildung 10: Gemeinden in Mittel- und Nordhessen mit keinen (gelb) oder nur wenigen (blau) Einträgen oben im Vergleich zu Gemeinden in Südhessen mit größtenteils mehreren (weiß) Einträgen unten

Weitere Schwierigkeiten und Probleme bereitete die Starkregenrecherche. Die Dokumentation von Starkregenereignissen ist in Großstädten meist besser als in Kleinstädten oder auf dem Land. Das kann darauf zurückgeführt werden, dass in stärker besiedelten Städten oft mehr Schäden entstehen und diese auch häufiger gemeldet werden als in dünn besiedelten ländlichen Gebieten. Dieser Zustand erklärt möglicherweise, dass in der Datenbank ländliche Gemeinden eher unterrepräsentiert erscheinen und das oben genannte Nord-Süd-Gefälle in Hessen, schließlich ist die Mitte und der Norden des Bundeslandes ländlicher geprägt als das dicht besiedelte Rhein-Main-Gebiet.

Die Daten zu den Starkregenereignissen stammen größtenteils von Feuerwehr-Einsatzberichten. Jedoch führen nicht alle Feuerwehren eigene Webseiten oder Facebook-Seiten mit Einsatzdokumentationen. Hinzu kommt, dass die Qualität der jeweiligen Internetseiten sehr stark schwankt. Die Archive reichen von Auflistungen von Schlagworten bis hin zu detaillierten Einsatzberichten. Darunter leidet die räumliche Repräsentativität der Datenbank, wenn belastbare Aussagen zur Starkregenhäufigkeit pro Gemeinde getroffen werden sollen. Es bildet sich eher die Anzahl der Schadensfälle ab als die Starkregenhäufigkeit. Wird in einer Gemeinde mit mehreren Starkregen-Einträgen einfach mehr gemeldet oder tritt dort tatsächlich häufiger Starkregen auf? Genau diese Frage soll mit den späteren räumlichen Starkregen-Analysen geklärt und möglichst repräsentative Hot-Spot-Gebiete gefunden werden.

Die Feuerwehr-Einsatzberichte sind oftmals auch uneindeutig, wenn statt von einzeln genannten Gemeinden von „weiten Teilen des Landkreises“ die Rede ist oder die Begriffe „Unwetter“, „Starkregen“ und „Hochwasser“ synonym verwendet werden. Um diese Qualitätsunterschiede abzufangen, wurden die Ereignisse klassifiziert. Besteht bei der Recherche die Unsicherheit, ob bei einem Eintrag wirklich Starkregen vorliegt, hilft außerdem ein Vergleich mit den Wetterdaten des betroffenen Tages. Ein Beispiel: Am 20.05.2019 gibt es viele Hochwasser-Meldungen aus dem Landkreis Kassel. Es ist aber nicht erkennbar, welche Niederschlagsart die Überschwemmungen ausgelöst hat. Beim Aufrufen der Wetterdaten dieses Tages wird aber klar, dass damals immer wieder Starkregengebiete über die Region hinweggezogen sind. Daher fällt das Ereignis eher in die Kategorie „(anhaltender) Starkregen“ als „(gleichmäßiger) Dauerregen“ und wird in die Datenbank aufgenommen.

Schließlich decken die Archive jeweils auch sehr unterschiedliche Zeiträume ab. Manche wurden ab einem bestimmten Zeitpunkt nicht weitergeführt, andere vor wenigen Jahren erst begonnen. Auffällig ist, dass vor allem für die letzten Jahre teils sehr ausführliche Einsatzberichte auf den jeweiligen Facebook-Seiten zur Verfügung stehen, die bei der Starkregenrecherche äußerst hilfreich waren. Die steigende Verbreitung und Nutzung des Internets und von Social-Media-Kanälen bedingt insgesamt einen Anstiegstrend der Einträge, sodass Ende der 2010er-Jahre allgemein mehr Einträge vorzufinden sind als Anfang der 2000er. Diese Tatsache muss unbedingt bei der zeitlichen Analyse bedacht werden.

Es wird deutlich, dass der Datenbank eine sehr heterogene Datengrundlage zugrunde liegt, die besonders auch auf die Kleinräumigkeit der Ereignisse und deshalb zu einer von Fall zu Fall höchst unterschiedlichen Beobachtung und Erfassung der Ereignisse zurückzuführen ist. Trotz der aufgeführten Einschränkungen ermöglicht die Datenbank jedoch eine gute qualitative Übersicht über das Auftreten und die Auswirkungen von Starkregenereignissen.



## **6. Auswertung der Starkregen-Datenbank**

Dieses Kapitel bildet den Hauptteil der vorliegenden Arbeit. Die Ergebnisse der zeitlichen und räumlichen Analysen, welche mit Microsoft Excel und ArcGIS durchgeführt wurden, werden präsentiert. Sie sollen Antworten auf die offenen Forschungsfragen liefern und wissenschaftliche Aussagen zur Eignung der Datenbank für die Auswertung von Starkregenereignissen erlauben können. Begonnen wird mit den zeitlichen Analysen. Darauf aufbauend folgt die räumliche Schwerpunktanalyse, die anhand verschiedener Kartenvarianten dargestellt wird.

### **6.1 Zeitliche Schwerpunkte von Starkregenereignissen**

Wird die zeitliche Entwicklung der Starkniederschläge untersucht, so liegt der Fokus zum einen auf dem Jahresverlauf, also der monatlichen Entwicklung innerhalb eines Jahres. Zum anderen auf der interannuellen Variabilität, der Entwicklung aufeinander folgender Jahre innerhalb eines festgelegten Zeitraums.

#### **6.1.1 Jahresverlauf**

Der Jahresverlauf zeigt eindeutig eine „Starkregensaison“ von Mai bis August (Abb. 11). Im Mai gibt es einen rasanten Anstieg der Werte. Das Maximum an Starkregenereignissen wird dann bereits im Juni verzeichnet. Danach nehmen die Werte zum Winter hin wieder stark ab. Ein kleineres Maximum ist jedoch auch im Januar erkennbar.

Da in Abbildung 11 alle Ereignisse der Starkregen-Datenbank einfließen, also auch jene, die in Klassifikation 1 als „ungültig“ eingeordnet wurden, bietet es sich an, einen bereinigten Jahresverlauf darzustellen. Dieser beruht auf der in 4.2 beschriebenen Strategie. Wird zunächst der Jahresverlauf der „unbereinigten“ Klassifikation 1 mit dem der Klassifikation 2 + 3 verglichen, fällt auf, dass die Werte in den Übergangsjahreszeiten und besonders im Winter bei Klassifikation 1 deutlich höher liegen als bei Klassifikation 2 + 3 (Abb. 12).

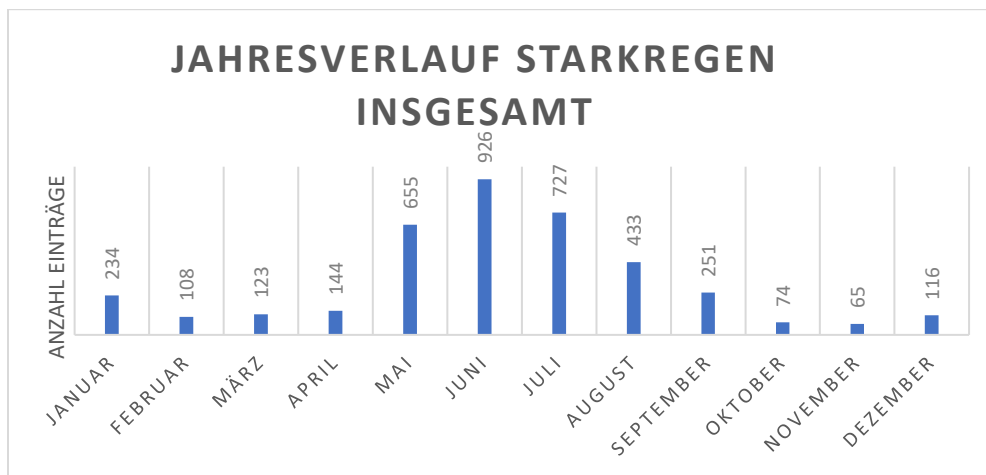


Abbildung 11: Monatliche Entwicklung aller Starkregen-Einträge (verändert nach Og 2020: 12)

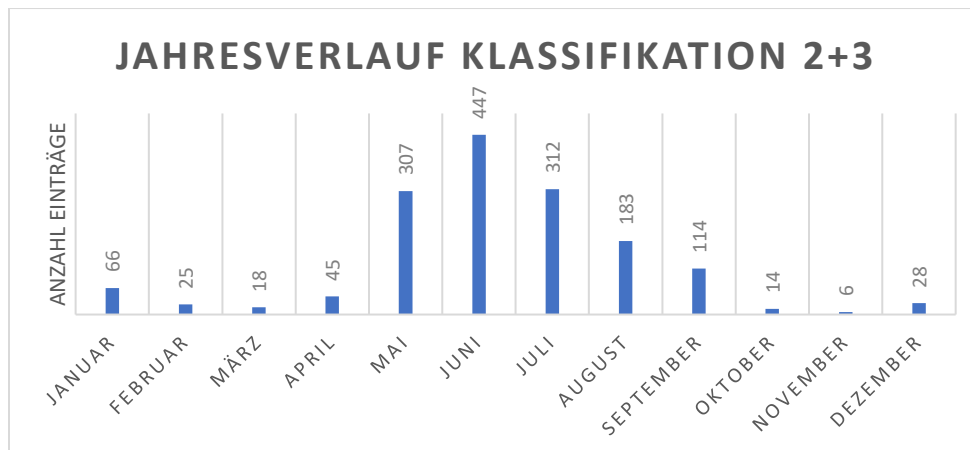
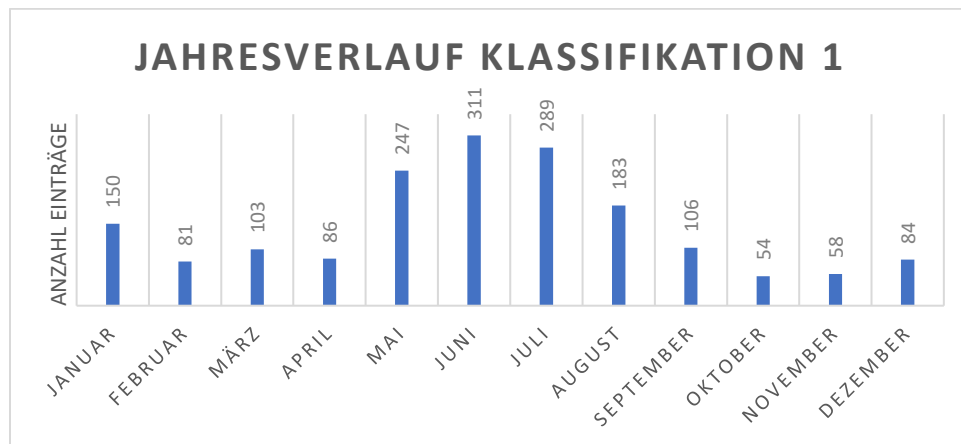


Abbildung 12: Gegenüberstellung der monatlichen Entwicklung der Einträge aus Klassifikation 1 und aus Klassifikation 2 + 3

Der Grund hierfür ist erkennbar, wenn die bereinigten Ereignisse aus Klassifikation 1, welche als „nicht-starkregenverursacht“ gelten, visualisiert werden (Abb. 13). Es ist kaum ein Jahresverlauf auszumachen und die Werte sind in den Wintermonaten verhältnismäßig hoch.

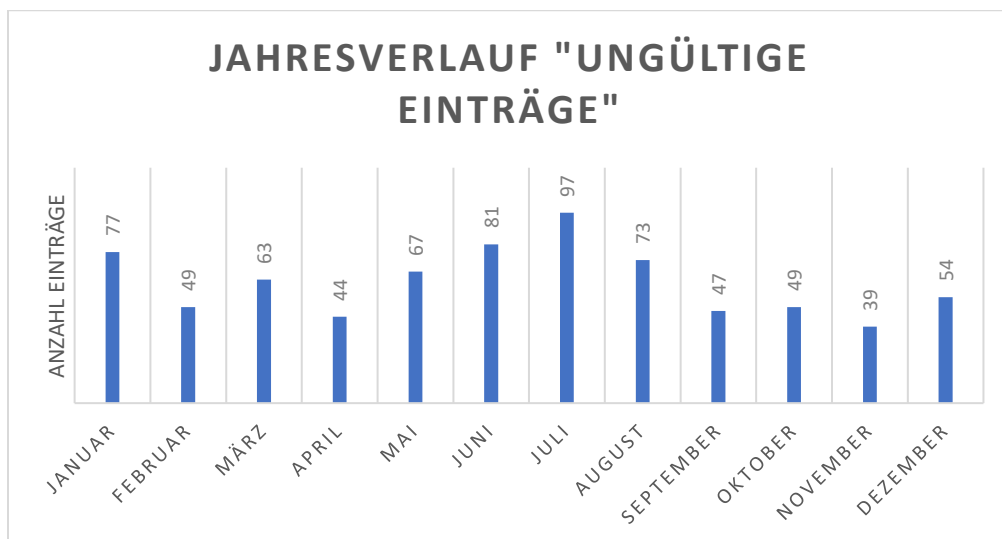


Abbildung 13: Monatlicher Verlauf der "ungültigen" Einträge aus Klassifikation 1

Diese „ungültigen“ Ereignisdaten sind dafür verantwortlich, dass der Jahresverlauf aller Klassifikationen etwas verfälscht wird und der Eindruck eines „Zweit-Maximums“ an Starkregenereignissen im Winter entsteht. Der bereinigte Jahresverlauf besteht schließlich aus den Einträgen in Klassifikation 2 + 3, inklusive der neu hinzugefügten Einträge, die fälschlicherweise in Klassifikation 1 gelistet waren, sowie der Einträge der Gemeindebefragung der Klassifikation 2 + 3 (Abb. 14). Dieser zeigt die monatliche Entwicklung der Starkniederschläge noch ausgeprägter als Abbildung 11 und insgesamt niedrigere Werte für die Wintermonate (wenn auch nach wie vor einen leichten Peak im Januar, der durch die in diesem Zeitraum häufig durchziehenden Sturmtiefs mit ihren Starkniederschlägen erklärt werden könnte). Solch ein Jahresverlauf ist typisch für Starkregenereignisse und bestätigt, dass die Datenbank in diesem Punkt bereits eine recht gute Aussagekraft besitzt.

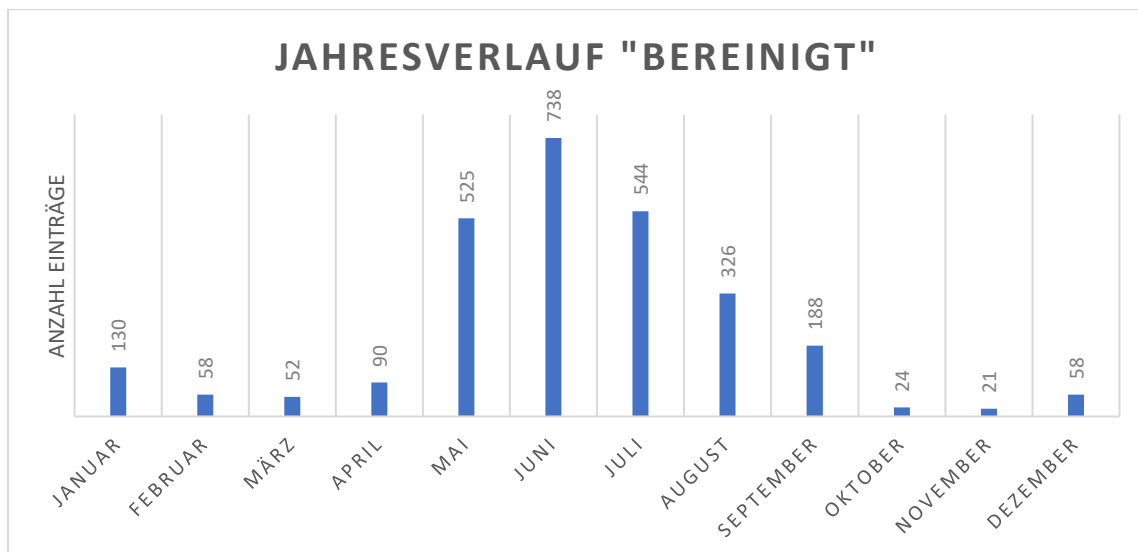


Abbildung 14: Monatliche Entwicklung nach "Bereinigung" der Klassifikation 1

### 6.1.2 Interannuelle Variabilität

Für eine Analyse der interannuellen Variabilität ist es notwendig, einen geeigneten Zeitraum auszuwählen, in dem für alle Einzeljahre eine ausreichende Datengrundlage vorhanden ist. Dieser Zeitraum wurde auf 2006 – 2019 festgelegt, da ab 2006 die Anzahl der Starkregen-Einträge in der Datenbank bei  $> 100$  / Jahr liegt (Abb. 15), was eine solide Grundlage für genauere Betrachtungen bietet. Dieser Zeitraum wird ebenso für die späteren räumlichen Analysen verwendet.

An dieser Stelle soll erneut darauf hingewiesen werden, dass das Ziel der zeitlichen Untersuchungen keine Trendanalyse ist, sondern ein Jahr-zu-Jahr-Vergleich innerhalb des ausgewählten Zeitraums! Zum einen ist der Zeitraum zu kurz, um einen Trend festmachen und Aussagen zu möglichen Einflüssen des Klimawandels in den vergangenen Jahren machen zu können. In der Klimaforschung werden für eine Trendanalyse verschiedene 30-jährige Zeiträume miteinander verglichen, um die natürlichen Schwankungen innerhalb von drei Jahrzehnten „herauszumitteln“. Zum anderen basiert der augenscheinlich stetige Anstieg der Einträge-Anzahl vor allem auf der besseren Dokumentation und intensiveren Internetnutzung in der jüngsten Vergangenheit.

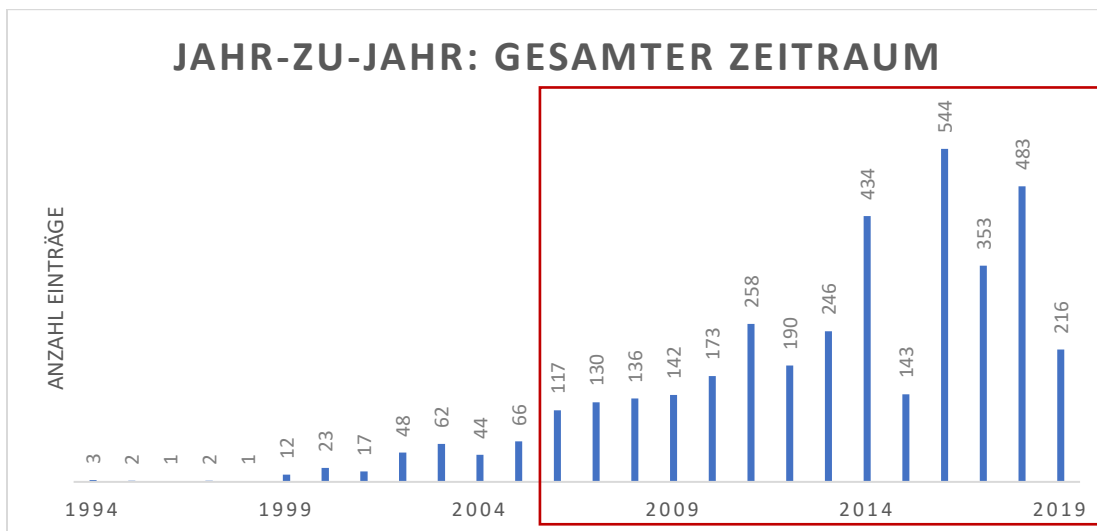


Abbildung 15: Überblick über die zeitliche Entwicklung der Starkregen-Einträge und ausgewählter Zeitraum. Hinweis: Es fehlen 13 Einträge, die sich auf die Jahre 1981 - 1993 verteilen, der Übersichtlichkeit halber aber nicht dargestellt sind. (verändert nach Og 2020: 7)

Wird zunächst die Jahr-zu-Jahr-Entwicklung aller Einträge betrachtet, so fallen vier Jahre sofort ins Auge: 2014, 2016 und 2018 als zeitliche Hot-Spot-Jahre der Starkregenereignisse und genau dazwischen 2015 als absolutes Low-Spot-Jahr (Abb. 16). Das Maximum der Starkregen-Einträge liegt bei 544 im Jahr 2016. Das Minimum im Zeitraum von 2010–2019 bei 143 im Jahr 2015 und damit etwa auf dem Niveau der Jahre vor 2010. 2014 und 2018 verzeichnen jeweils über 400 Einträge. Ändert sich diese Verteilung, wenn jetzt wieder, wie vorher beim Jahresverlauf, die bereinigten Daten herangezogen werden?

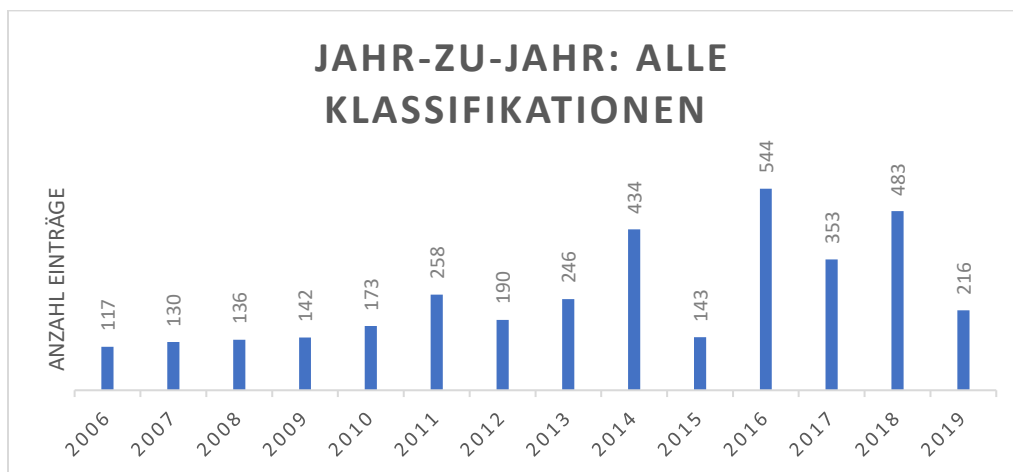


Abbildung 16: Unbereinigte zeitliche Entwicklung aller Einträge im ausgewählten Zeitraum (verändert nach Og 2020: 7)

Der Vergleich von Klassifikation 1 (unbereinigt) mit Klassifikation 2 + 3 zeigt, dass das Maximum an Einträgen bei Klassifikation 1 im Jahr 2018 liegt, während es bei Klassifikation 2 + 3 2016 ist (Abb. 17). 2014 hat bei Klassifikation 2 + 3 die zweithäufigsten Einträge knapp hinter 2016, bei Klassifikation 1 dagegen deutlich weniger. Umgekehrt hat das Jahr 2017 bei Klassifikation 1 deutlich mehr Einträge vorzuweisen als bei Klassifikation 2 + 3. Wie in Abb. 18 ersichtlich wird, befinden sich darunter jedoch viele ungültige. Die interannuelle Variabilität scheint bei Klassifikation 2 + 3 stärker ausgeprägt zu sein, die Hot-Spot-Jahre 2014, 2016 und 2018 grenzen sich dennoch in allen Klassifikationen deutlich vom Rest ab.

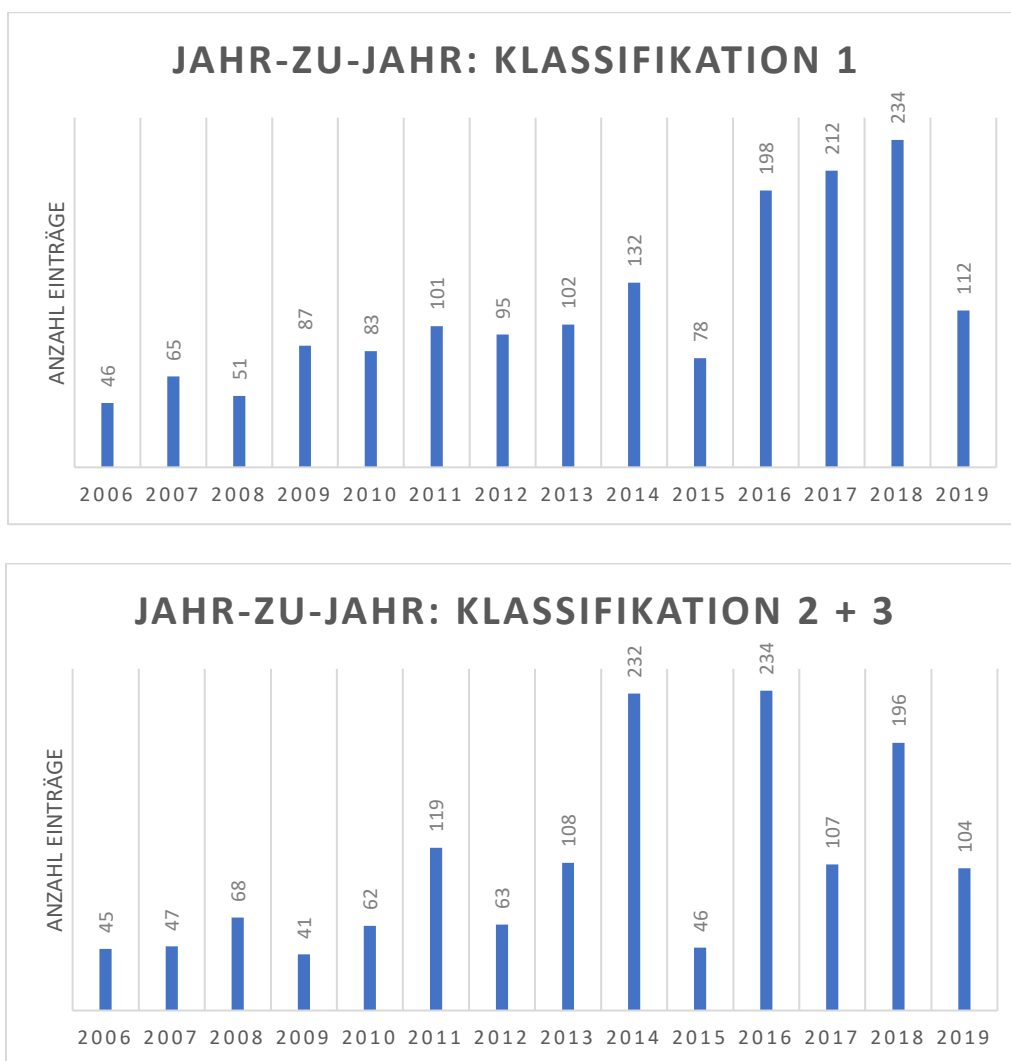


Abbildung 17: Gegenüberstellung der Jahr-zu-Jahr-Entwicklung der Einträge aus Klassifikation 1 und Klassifikation 2 + 3

Interessante Einblicke liefern zudem die veranschaulichten Ergebnisse derjenigen Einträge aus Klassifikation 1, die nachträglich als „Starkregenereignis“ identifiziert und Klassifikation 2 + 3 hinzugeführt wurden, sowie derjenigen Einträge, die nun als „ungültig“ gelten (Abb. 18). Bei Ersteren sind mit nur wenigen Einträgen die Jahre 2006 – 2008 eher unbedeutend, 2018 sticht dagegen als Jahr mit über 180 Einträgen hervor. Somit bekommt das Jahr einen enormen Zuwachs an Einträgen, die für die Analyse verwendet werden können. Bei den ungültigen Einträgen liegen zwar die Jahre 2016, 2017 und 2019 mit jeweils um 60 Einträgen vorne, jedoch haben alle betrachteten Jahre sehr ähnliche Mengen bzw. die Differenz ist nicht groß. Das passt gut ins Bild, dass „nicht-starkregenverursachte“ Einträge wie Wasserrohrbrüche jedes Jahr ungefähr gleich häufig auftreten sollten.

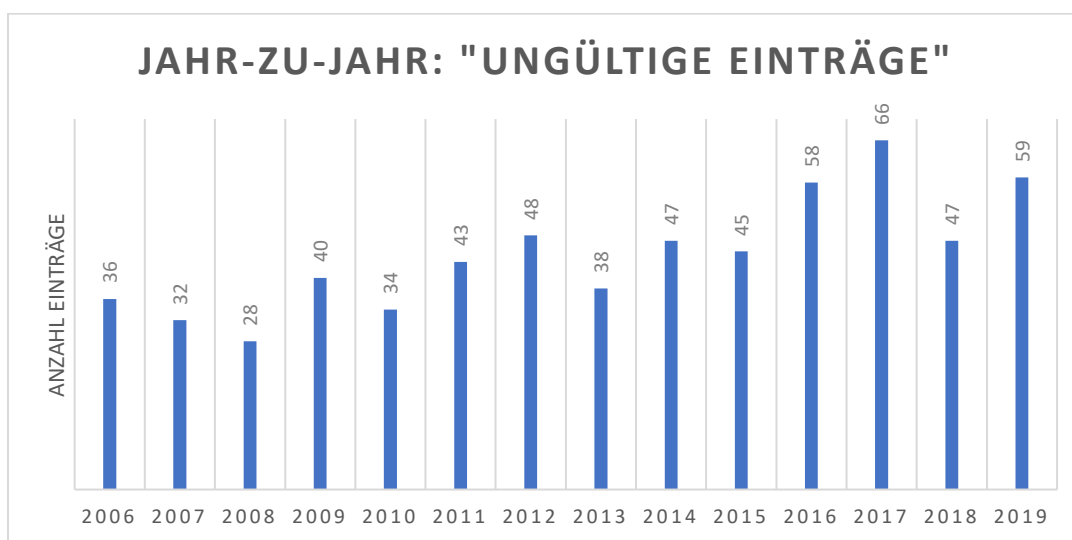
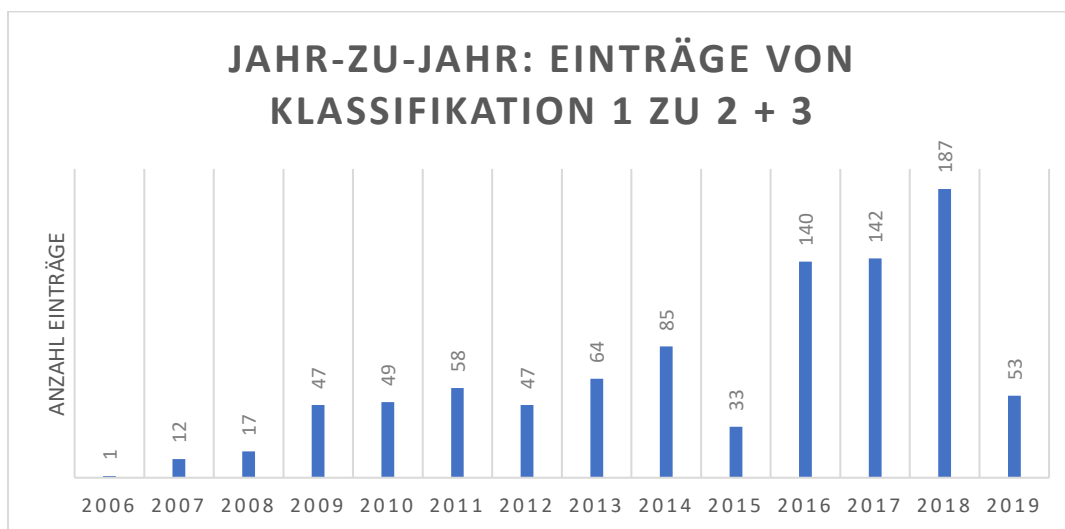


Abbildung 18: Gegenüberstellung der "aufgeteilten" Einträge aus Klassifikation 1

Die bereinigte Darstellung hat sich vom allgemeinen Jahr-zu-Jahr-Verlauf her im Vergleich zur unbereinigten Visualisierung kaum verändert, nach wie vor können die Jahre 2014, 2016 und 2018 als Hot-Spot-Jahre angesehen werden (Abb. 19). Jedoch sind die Jahre vor 2010 und auch das Jahr 2015 auf jeweils unter 100 Einträge gesunken, diese Jahre haben durch die Filterung mehr Einträge verloren als hinzugewonnen. 2016 hat außerdem den ersten Platz als „Maximum“ knapp an das Jahr 2018 abgegeben, bedingt durch die hohe Anzahl an Einträgen, die für 2018 von Klassifikation 1 in Klassifikation 2 + 3 gewandert sind. Folglich scheint die Starkregen-Datenbank eine interannuelle Variabilität der Starkregenereignisse in diesem 14-Jahres-Zeitraum insbesondere für die Jahre 2011 – 2018 durchaus widerzuspiegeln, wodurch ein Vergleich aufeinanderfolgender Jahre auch für die räumlichen Analysen zulässig erscheint.

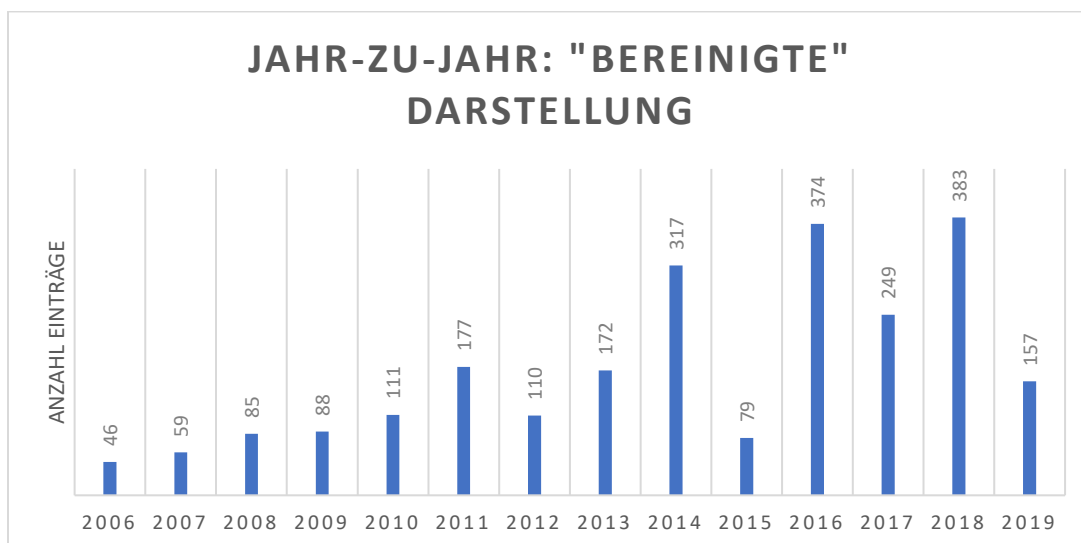


Abbildung 19: Jahr-zu-Jahr-Verlauf nach der Filterung



## 6.2 Räumliche Schwerpunkte von Starkregenereignissen

Zunächst werden bei der räumlichen Analyse die Gesamtzahl der Starkregenereignisse, teils aufgeteilt nach Klassifikationen, betrachtet. Darauf folgt die Vorstellung einiger auffälliger Einzeljahre und schließlich die Darstellung von vier Einzelereignissen mit zeitlichen Skalen im Bereich von Stunden bis Monaten.

### 6.2.1 Nach Klassifikationen

Wie schon bei der zeitlichen Analyse kann die Einteilung nach den Klassifikationen auch bei der räumlichen Analyse von Nutzen sein. Zunächst wird die Klassifikation 1 genauer betrachtet. Abbildung 20 zeigt die noch unveränderte Klassifikation 1, also mit allen Einträgen dieser Klassifikation in der Starkregen-Datenbank.  $n$  ist die Anzahl der Gemeinden, für die Starkregen-Einträge vorliegen. Die Starkregen-Ereignisse sind relativ gleichmäßig verteilt und bewegen sich in ihrer Häufigkeit auf einem einstelligen bis niedrigen zweistelligen Niveau. Vier Gemeinden stechen jedoch mit besonders hohen Werten hervor. Zwei davon, Marburg und Bad Homburg, weisen ebenfalls hohe „ungültige“ Einträge auf (Abb. 21 links). Auch bei den Einträgen, die nachträglich von Klassifikation 1 zu Klassifikation 2 + 3 gewandert sind, haben die beiden Gemeinden erhöhte Werte (Abb. 21 rechts). Marburg und Bad Homburg haben also bei der „Bereinigung“ der Klassifikation 1 einerseits einen großen Verlust an Einträgen zu verzeichnen, andererseits wird auch eine nicht unerhebliche Zahl an Einträgen dieser beiden Gemeinden neu zugeordnet. Ein jeweils stichprobenartiger Vergleich der „ungültigen“ Ereignisdaten mit Wettermesswerten bestätigt die Ergebnisse. Es sind keine Auffälligkeiten bezüglich besonders hoher Niederschlagssummen zu erkennen. In der Datenbank haben Marburg und Bad Homburg in Klassifikation 1 außerdem zum einen fast jedes Jahr Einträge, sodass generell eine recht hohe Zahl an Einträgen in Klassifikation 1 zusammenkommt. Zum anderen verhältnismäßig viele Einträge außerhalb der üblichen Starkregensaison, was für die vielen ungültigen Einträge spricht. Abgesehen von diesen Besonderheiten bewegen sich die restlichen Werte bei Abbildung 21 meist im niedrigen einstelligen Bereich.

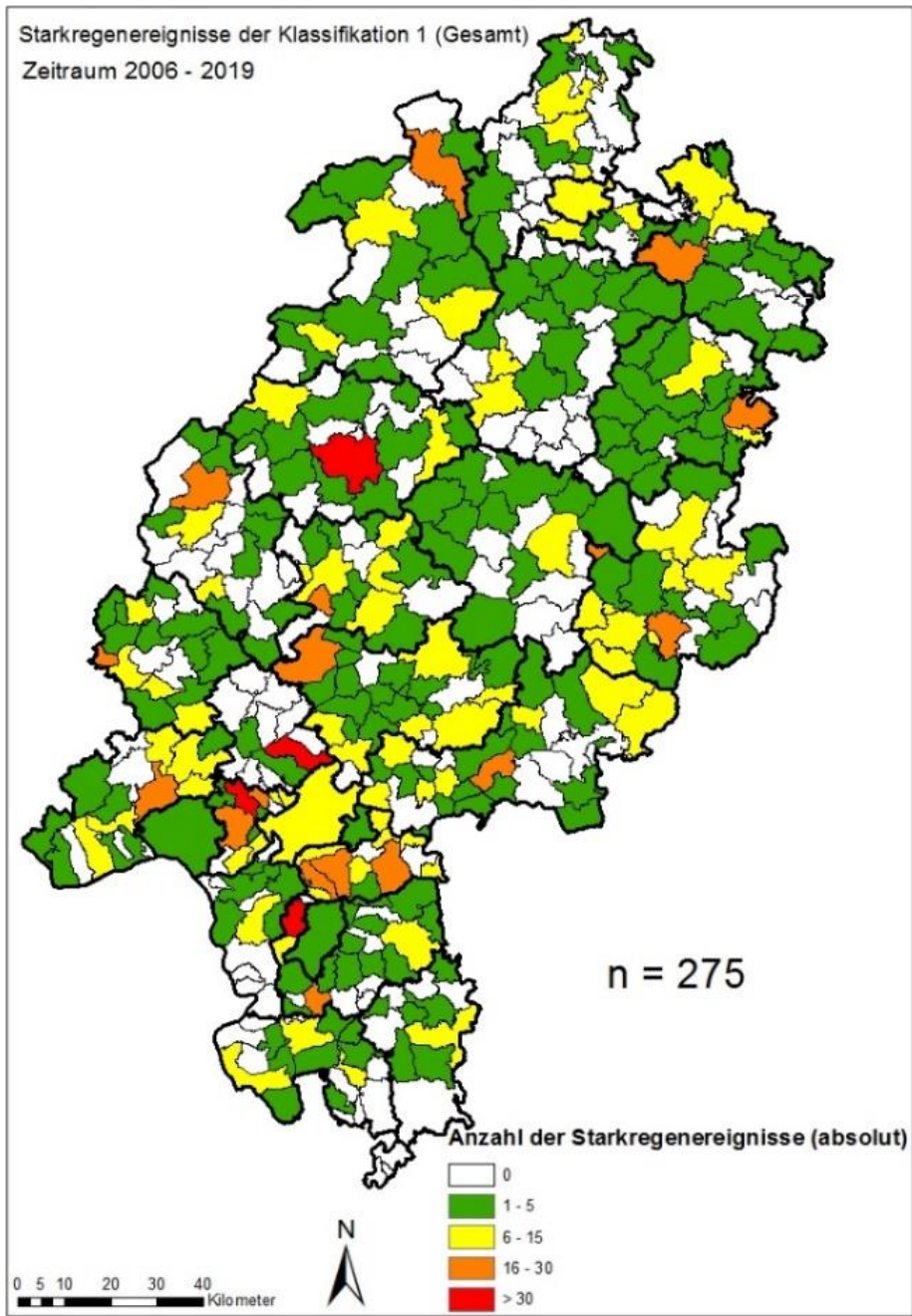


Abbildung 20: Absolute Anzahl der Starkregenereignisse in der unveränderten Klassifikation 1

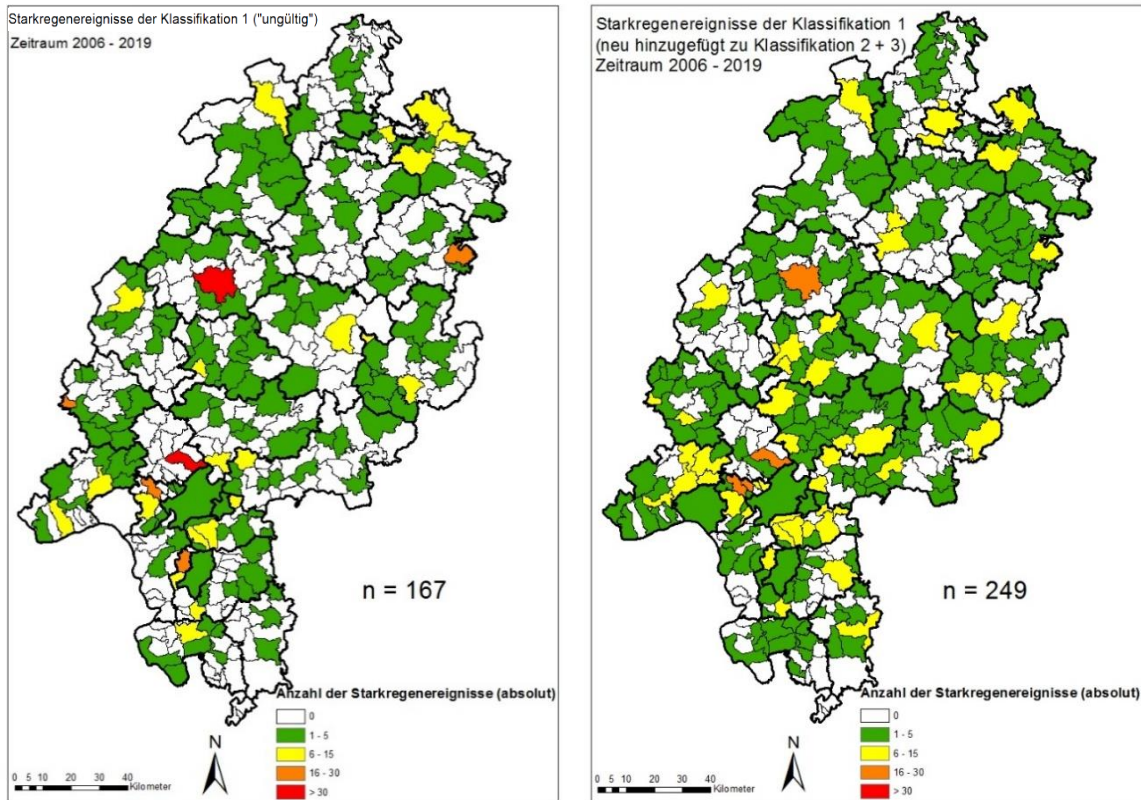


Abbildung 21: Aufteilung der Klassifikation 1 in „ungültige“ Einträge (links) und „neu zu Klassifikation 2 + 3 hinzugefügte“ (rechts)

Ein ähnliches Verteilungsmuster wie bei Klassifikation 1 existiert auch bei Klassifikation 2 + 3 (Abb. 22). Marburg hat auch hier eine hohe Anzahl an Starkregen-Einträgen vorzuweisen. Anders als bei Klassifikation 1 sind nun aber die kreisfreien Städte Frankfurt und Wiesbaden sowie die Gemeinde Eltville am Rhein aufgrund vieler Starkregen-Einträge auffällig. Auch einige weitere Gemeinden im Rhein-Main-Gebiet zeigen deutlich erhöhte Werte. Dass hier besonders die zwei größten Städte des Landes zum Vorschein treten, könnte nicht nur an der oftmals besseren Dokumentation von Starkregen-Einsätzen durch dort existente Berufsfeuerwehren liegen, sondern auch an der generellen Dokumentationspraxis von Feuerwehren. Nach einem Starkregen-Ereignis kommt es in kurzer Zeit zu einer sehr großen Anzahl gleichzeitig gemeldeter Einsatzstellen. Kutschker (2018: 62) definiert es genauer: „Diese zeitliche Eingrenzung relevanter Starkregeneignisse lässt sich über die Identifikation der Häufung von Feuerwehreinsätzen (mindestens 20) mit dem Einsatzstichwort „H1-Wasser im Keller“ in einer Gebietskörperschaft innerhalb einer Stunde herbeiführen“. Dieser Schwellenwert wird in Städten aufgrund der größeren Fläche auch bei vergleichsweise schwächeren Starkregen-Ereignissen schneller erreicht.

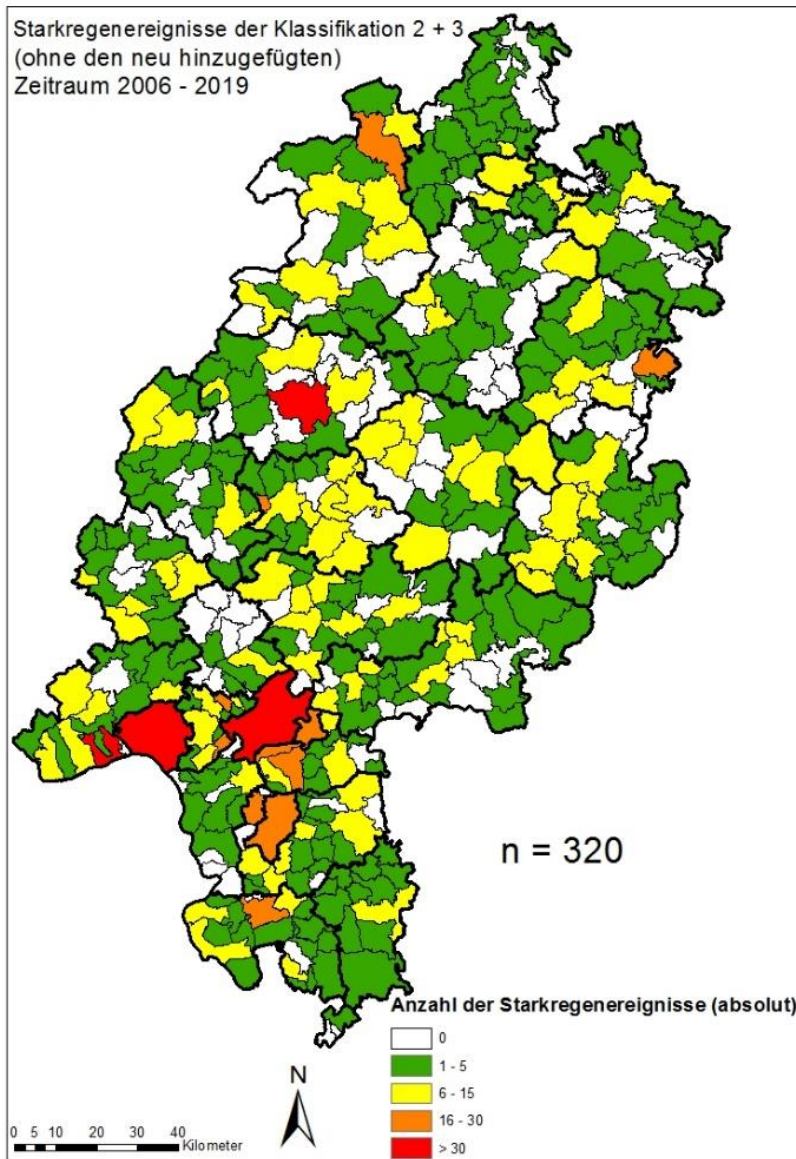


Abbildung 22: Absolute Anzahl der Starkregenereignisse in der unveränderten Klassifikation 2 +

Für eine abschließende Beurteilung muss die bereinigte Version der „Klassifikations-Karten“ herangezogen werden (Abb. 23 links). Zur Erinnerung: Darin sind alle Einträge der Klassifikation 2 + 3, inklusive der neu hinzugefügten Einträge, die fälschlicherweise in Klassifikation 1 gelistet waren, sowie der Einträge der Gemeindebefragung der Klassifikation 2 + 3. Da verstädterte Gebiete die Ergebnisse beträchtlich verzerren können, wird zusätzlich die Anzahl von Starkregen-Ereignissen pro 100 000 Einwohner abgebildet, die in diesem Fall aussagekräftiger ist und auf die deshalb besonderes Augenmerk gelegt werden soll (Abb. 23 rechts). Die Verteilung der Starkregen-Ereignisse in Hessen ist demnach allgemein relativ gleichmäßig. Die Daten der Starkregen-Datenbank bestätigen also das Streuselkuchen-Muster, welches auch charakteristisch für die KLIMPRAX-Starkregen-Karten ist (vgl. Abb. 4). Mit 346 (von 422) Gemeinden bieten diese Karten zudem eine deutlich flächendeckendere Abdeckung als die KLIMPRAX-Starkregen-Karten. In absoluten Zahlen sticht vor allem das Rhein-Main-Gebiet an sich und die Stadt Marburg hervor. Die hohe Anzahl in Marburg lässt sich dadurch erklären, dass die Stadt in vielen Jahren auf einem mittleren, 2018 sogar auf einem hohen Niveau an Starkregenereignissen liegt. Möglicherweise spielt hier auch eine gute Einsatzdokumentation der Feuerwehr hinein. In der Darstellung pro 100 000 Einwohner tun sich als Schwerpunkte besonders zwei Regionen hervor: Das Rheingau und der östliche Teil von Hessen, vom Werra-Meißner-Kreis über den Kreis Hersfeld-Rotenburg bis zum Landkreis Fulda und dem Vogelsbergkreis. Die Gemeinde Eltville im Rheingau ist die einzige (!) hessische Gemeinde, die sowohl in absoluten Zahlen als auch in der pro 100 000 Einwohner Berechnung sehr hohe Werte (rot) aufweist. Sie hat für jedes Jahr außer 2019 Einträge zu verzeichnen, was die hohen Werte erklären könnte. Das Rheingau und die Gebiete um Vogelsberg und Rhön scheinen auf den ersten Blick nicht viel gemeinsam zu haben und doch verbindet sie etwas, was sie besonders vulnerabel gegenüber Starkregen macht: die Topographie. Auf der einen Seite das Rheingau als Weinbauregion mit steilen Hängen der südlichen Ausläufer des Taunus. Auf der anderen Seite der Vogelsberg und die Rhön als Mittelgebirge, die in ihrer Nord-Süd-Ausdehnung prädestiniert sind als natürliche Barriere für die häufig von Westen aufziehenden Wetterfronten. Dass von allen Rheingau-Gemeinden, die von ähnlicher Topographie geprägt sind, vor allem Eltville hervorsticht, könnte ein Hinweis darauf sein, dass die dortige Feuerwehr besonders aufmerksam ihre Starkregen-Einsatzberichte pflegt.

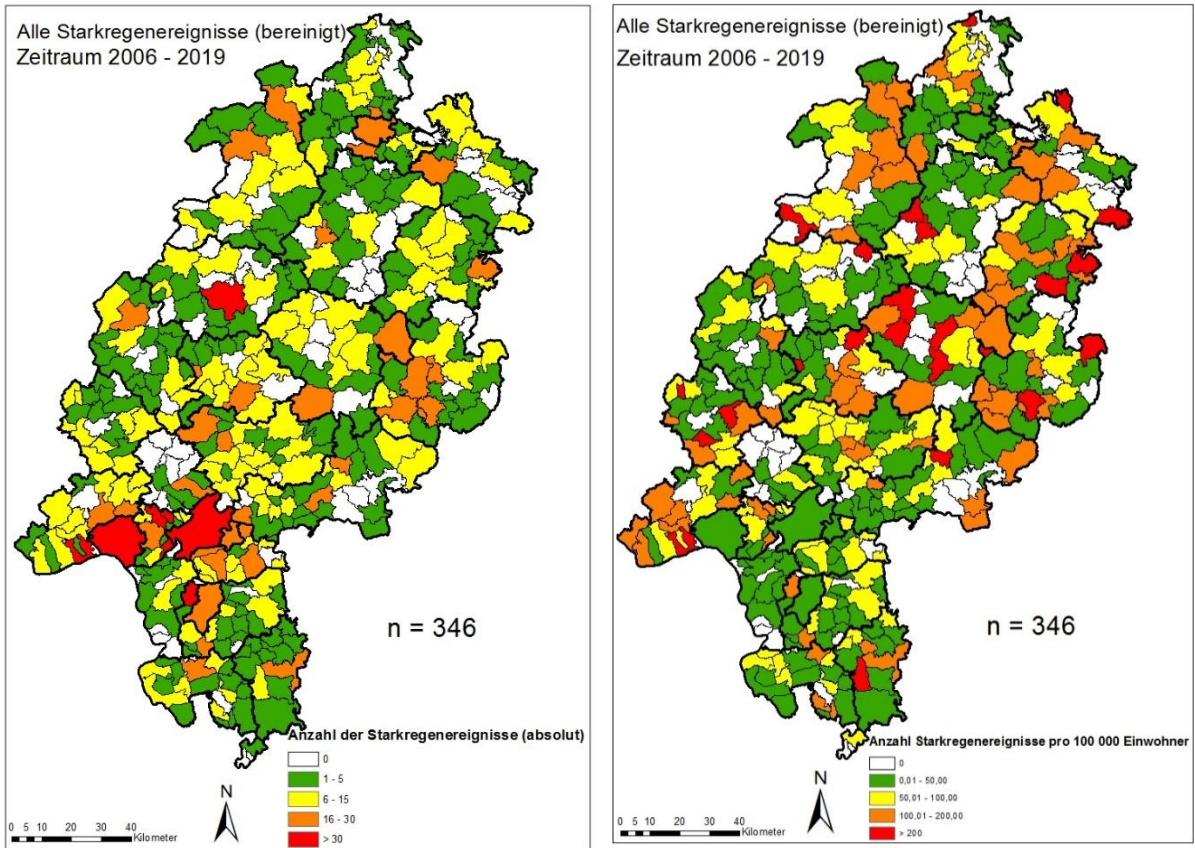


Abbildung 23: Bereinigte Version aller Starkregenereignisse im ausgewählten Zeitraum

## 6.2.2 Nach Einzeljahren

Die zuletzt betrachtete bereinigte Klassifikations-Karte dient zugleich als Grundlage für die Auswertung der einzelnen Jahre im Zeitraum 2006 – 2019. Aus Platzgründen kann nachfolgend nicht jedes Einzeljahr im Detail durchgegangen werden. Der Fokus liegt auf zwei „Low-Spot-Jahren“ – 2008 und 2015 – sowie besonders auf zwei „Hot-Spot-Jahren“ – 2016 und 2018. Die restlichen Einzeljahres-Karten sind im Anhang zu finden.

Wie schon aus der zeitlichen Auswertung der Starkregen-Datenbank hervorgegangen ist, liegen die Jahre 2006 – 2009 und das Jahr 2015 alle auf einem ähnlich niedrigen Niveau, was die Anzahl der Starkregen-Einträge betrifft. Sind die wenigen Einträge nun darauf zurückzuführen, dass in den betroffenen Jahren weniger Starkregen-Meldungen von den Feuerwehren dokumentiert wurden oder gab es tatsächlich weniger Starkregen-Ereignisse? Für das Jahr 2015 scheint es nicht unplausibel zu sein, dass es wirklich weniger Starkregen-Ereignisse gab, denn in den Jahren drum herum liegt die Anzahl der Einträge deutlich höher. Deshalb ist es unwahrscheinlich, dass nur 2015 plötzlich weniger gemeldet bzw. dokumentiert wurde. Der Wetterrückblick für das Jahr 2015 bestätigt diese Vermutung: Die Landesmitte und der Süden Deutschlands litten unter langen Dürreperioden, sodass teilweise nur die Hälfte des üblichen Jahresniederschlags fiel (WetterOnline 2015). Die vielen und langen Trockenperioden im Sommer wurden außerdem von Hitze begleitet. In Frankfurt erreichte die Temperatur Anfang August fast 40°C (Kundisch 2015). Für den Zeitraum 2006 – 2009 muss jedoch davon ausgegangen werden, dass die niedrige Anzahl an Starkregen-Einträgen zum Teil mit einer zu dieser Zeit noch geringeren Internetnutzung und Dokumentationshäufigkeit von Starkniederschlägen zusammenhängt.

Bei der Betrachtung der Karten für 2008 (exemplarisch für den Zeitraum 2006 - 2009) und 2015 gibt es keine nennenswerten Besonderheiten (Abb. 24). Die Starkregen-Einträge liegen überall in Hessen verteilt auf einem niedrigen einstelligen Niveau. Im überwiegenden Teil der Gemeinden liegt die Anzahl der Einträge in beiden Jahren sogar bei 0.

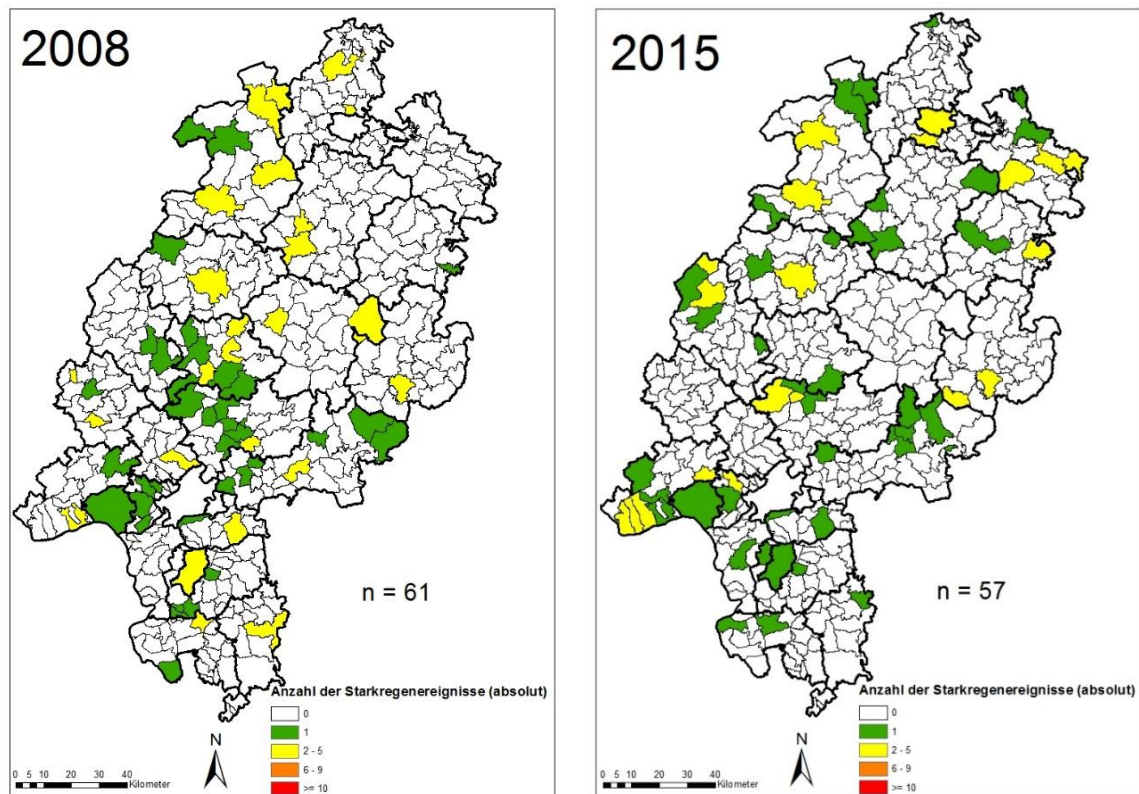


Abbildung 24: Die Jahre 2008 und 2015 im Vergleich

Besonders viele Starkregen-Ereignisse verzeichnen die Jahre 2014, 2016 und 2018. 2016 gab es einen unwetterträchtigen Frühsommer mit einer langen Unwetterserie, die unter anderem die eingangs erwähnte Sturzflut in Braunsbach hervorbrachte (WetterOnline 2016). Diese Unwetterlage wird im Kapitel 6.2.3 „Einzelereignisse“ noch genauer betrachtet. Wie ein Blick auf die absoluten Zahlen verrät, muss davon aber vor allem das Rhein-Main-Gebiet betroffen gewesen sein (Abb. 25 links). Eine Gemeinde sticht in diesem Jahr mit einem hohen Wert sowohl bei der absoluten Anzahl der Starkniederschlagsereignisse als auch bei der Anzahl pro 100 000 Einwohner hervor (Abb. 25 rechts): Elz im Landkreis Limburg-Weilburg. Im Wetterextreme-Portal des HLNUG zeigt ein Blick auf die Daten der nächstgelegenen Wetterstation Holzheim bei Diez im Jahr 2016 5 Tage mit Tagesniederschlagssummen höher als 20 mm, 4 davon sogar höher als 30 mm. Die Auffälligkeit der Gemeinde in den Karten scheint also plausibel zu sein.



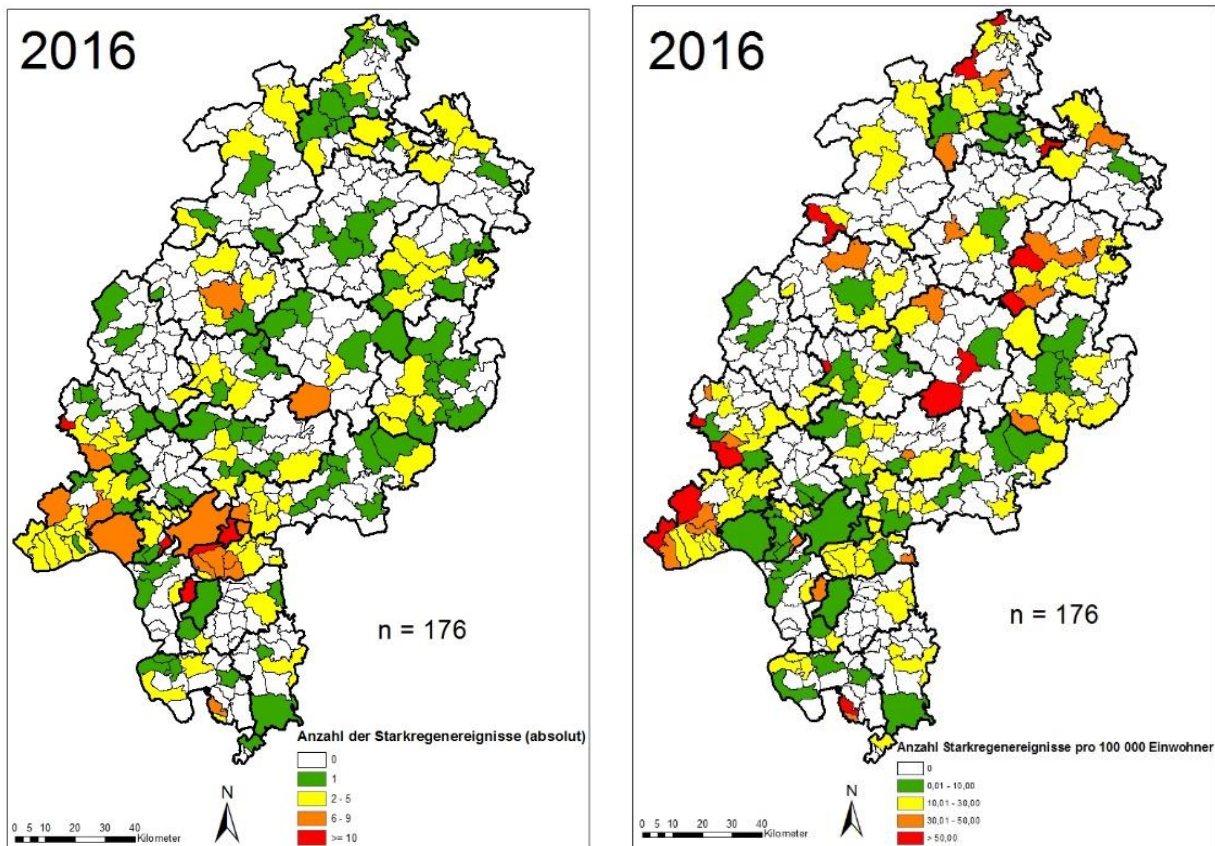


Abbildung 25: Anzahl der Starkregenereignisse im Jahr 2016

Es klingt paradox, doch die meisten Starkregen-Einträge liegen für 2018 vor und das obwohl das Jahr als ein ausgesprochenes Dürrejahr gilt. Unterschiede zum allgemein nasserem 2016 lassen sich bei den absoluten Werten schon auf den ersten Blick erkennen: Während es 2016 einige Gemeinden gibt mit hohen bis sehr hohen Werten von 6 – 9 bzw.  $\geq 10$  Starkregenereignissen pro Gemeinde, so liegen die Werte 2018 landesweit auf einem deutlich niedrigeren Niveau mit häufig 2 – 5 Starkregenereignissen pro Gemeinde (Abb. 26 links). Insgesamt ist die Differenz jedoch gering: 2016 finden sich in der Starkregen-Datenbank 374 Einträge aus 176 Gemeinden, 2018 383 Einträge aus 190 Gemeinden. Die Unterschiede lassen sich vermutlich darauf zurückführen, dass der Sommer 2016 geprägt war von einem ständigen Wechsel der Luftmassen, bei dem langsam ziehende Starkregengebiete immer wieder die gleichen Orte trafen. 2018 dagegen entwickelten sich landesweit ziemlich gleichmäßig verteilt hin und wieder lokale konvektive Starkregen-Ereignisse, die sich aber auf keine Region konzentrierten. Nur die Stadt Marburg bildet mit sehr hohen Werten eine Ausnahme. Die Stadt überschreitet im Zeitraum 2006 – 2019 insgesamt dreimal den Schwellenwert für Starkregen-Ereignisse von ca. 52 mm pro Tag, welche

im Schnitt alle 20 Jahre auftreten: 2011, 2017 und 2018. 2018 zählt 2 Tage mit jeweils über 50 mm, den 13.05. und 23.09. Mit erhöhten Werten der absoluten Anzahl sowie sehr hohen Werten bei der Anzahl pro 100 000 Einwohner fallen außerdem die Nachbargemeinden Weilmünster und Weinbach im Landkreis Limburg-Weilburg auf (Abb. 26 rechts). Beide Gemeinden verzeichnen 2018 in der Starkregen-Datenbank jeweils 7 Tage mit Starkregen-Einträgen, 3 Tage davon überschneiden sich – 29.05., 07.06. und 05.07. Wetterdaten von Kachelmannwetter bestätigen für die genannten Tage hohe Niederschlagssummen.

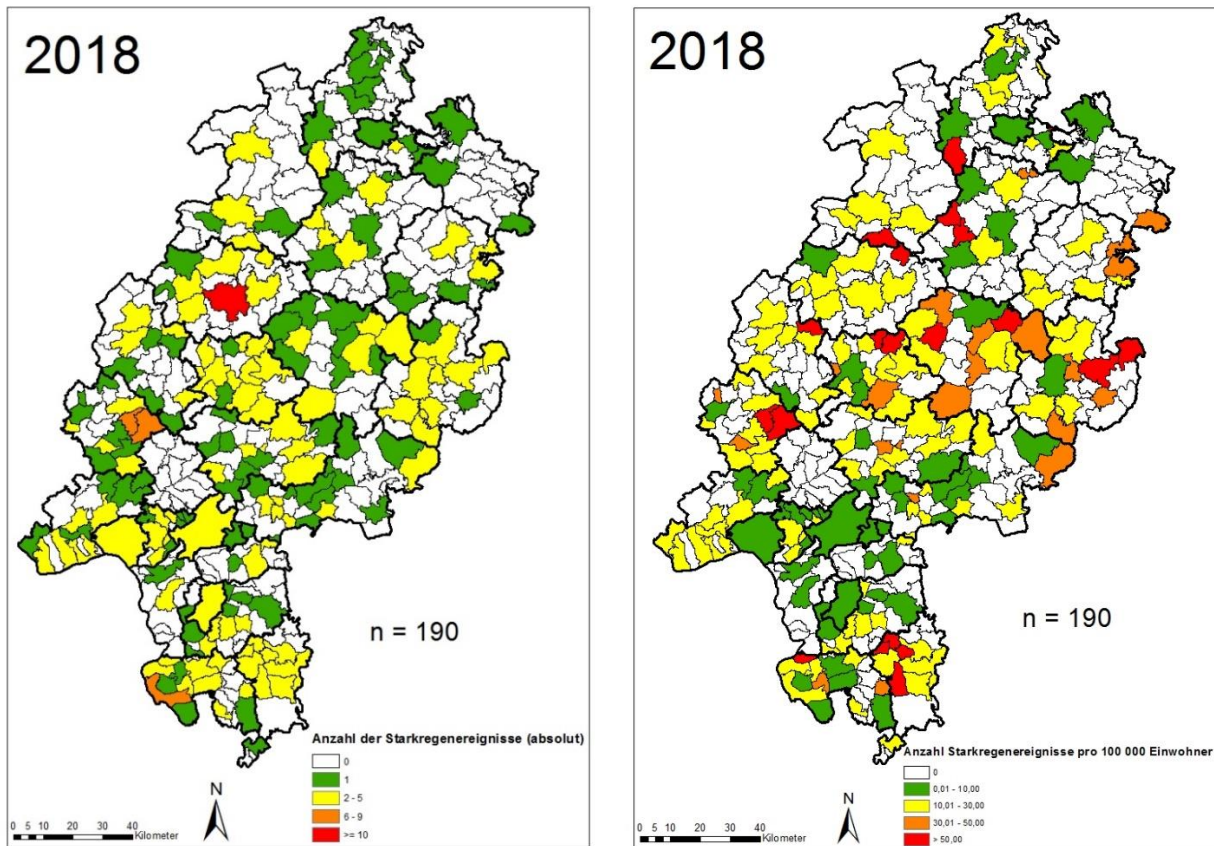


Abbildung 26: Anzahl der Starkregenereignisse im Jahr 2018

### 6.2.3 Nach Einzelereignissen

Zum Abschluss des Kapitels werden Einzelereignisse näher betrachtet, die im ausgewählten Zeitraum besonders hervorstechen und sich anhand der Karten räumlich gut darstellen lassen.

An 3 Tagen, vom 19. – 21.05.2019, kam es vor allem in Nordost-Hessen zu zahlreichen Feuerwehr-Einsätzen nach Starkniederschlägen (Abb. 27). Verantwortlich dafür war das Tiefdruckgebiet „Axel“, das vielerorts in Deutschland für Stark- und Dauerregen sorgte. So musste beispielsweise die A4 bei Fulda wegen überfluteter Fahrbahn gesperrt werden (Spiegel 2019). Messwerte der betroffenen Tage zeigen im Norden und Osten Hessens großflächig 12-stündige Regenmengen von ca. 30 – 70 l/m<sup>2</sup>. Dass diese aber nicht „auf einmal“ vom Himmel kamen, sondern sich im Verlauf mehrerer Stunden summierten, bilden die 1-stündigen Messwerte von Kachelmannwetter ab. Es gab in der Fläche anhaltenden Regen, der aber besonders am 20.05.2019 durch Starkregen mit Mengen bis zu 40 l/m<sup>2</sup> in 1 Stunde verstärkt wurde.

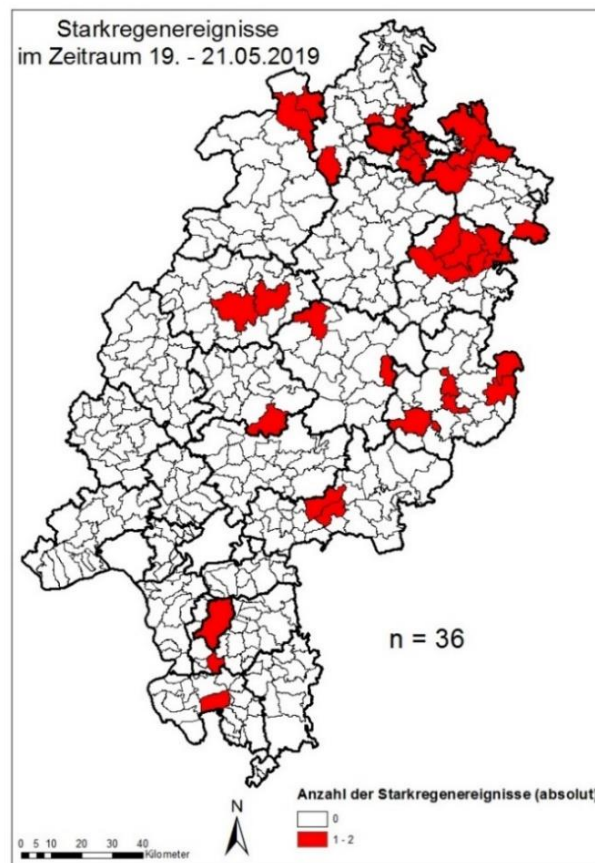


Abbildung 27: Verteilung von Starkregenereignissen vom 19. - 21.05.2019

Im Jahr zuvor finden sich am 23.09.2018 zahlreiche Starkregen-Einträge in der Datenbank. Besonders betroffen war diesmal der südliche und östliche Teil von Hessen, ganze 56 Gemeinden verzeichnen an diesem einzigen Tag Starkregenereignisse (Abb. 28). Ursache war Sturm „Fabienne“, der vor allem quer über der Mitte Deutschlands Gewitter und Schauer mit Starkregen brachte. Aus dem Vogelsbergkreis und Bad Hersfeld wurden sogar Schlammlawinen gemeldet. Die Regenmengen betragen in dieser Region um  $50 \text{ l/m}^2$  in 24 Stunden (Lefebvre et al. 2018).

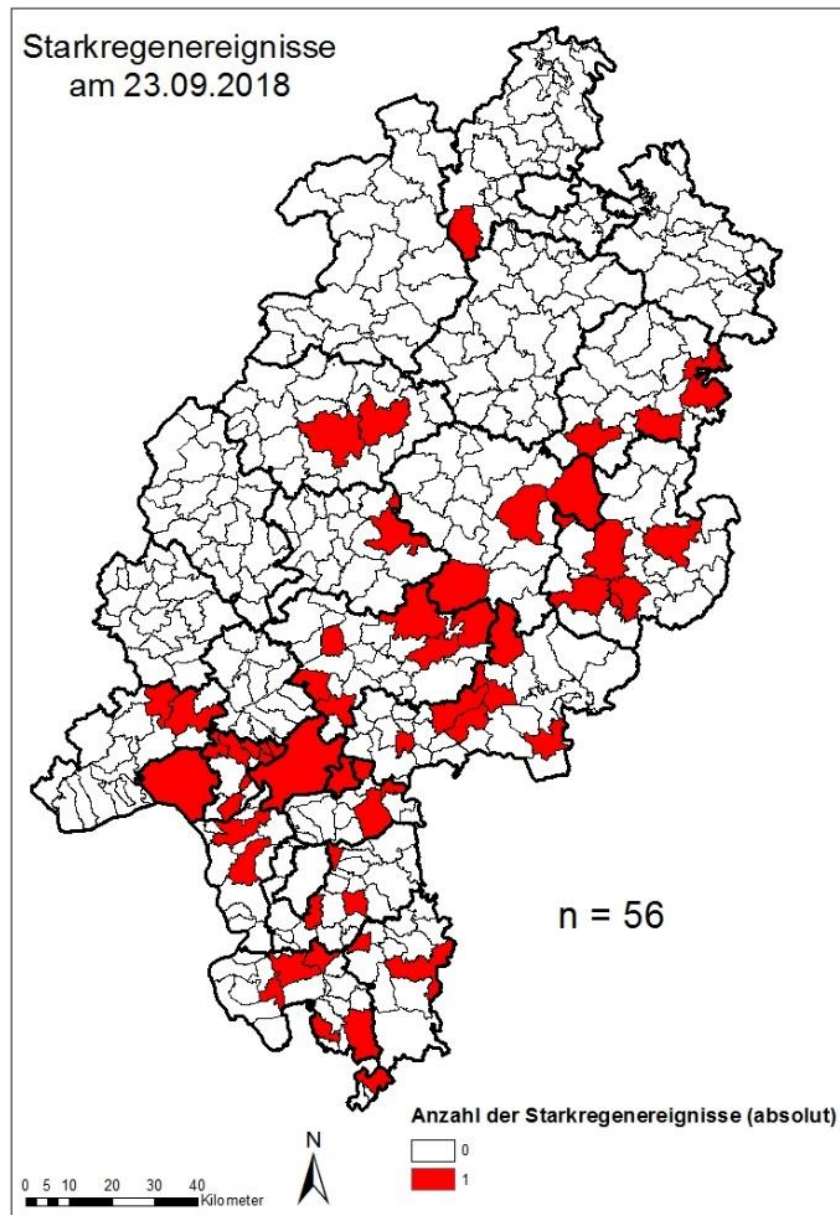


Abbildung 28: Verteilung von Starkregenereignissen am 23.09.2018

Wie bereits erwähnt, war der Frühsommer 2016 geprägt von einer wochenlangen Unwetterlage. Nachdem sich die Unwetterserie aus dem Mai auch im Juni fortsetzte, brachte der Monat vielerorts neue Niederschlagsrekorde. Es bildeten sich jeden Tag zahlreiche Schauer und Gewitter, die bei nur schwachem Höhenwind fast ortsfest waren und daher lokal eng begrenzt sehr große Regenmengen innerhalb kurzer Zeit brachten (Sävert 2017). Wie schon Abbildung 25 gezeigt hat, war davon vor allem das Rhein-Main-Gebiet und der Taunus betroffen. Weitere Schwerpunkte zeigen sich in ganz Hessen verteilt: Teile des Ostens rund um Fulda und Nordens rund um Kassel sowie ein Gebiet zwischen Vogelsberg und Marburg (Abb. 29).

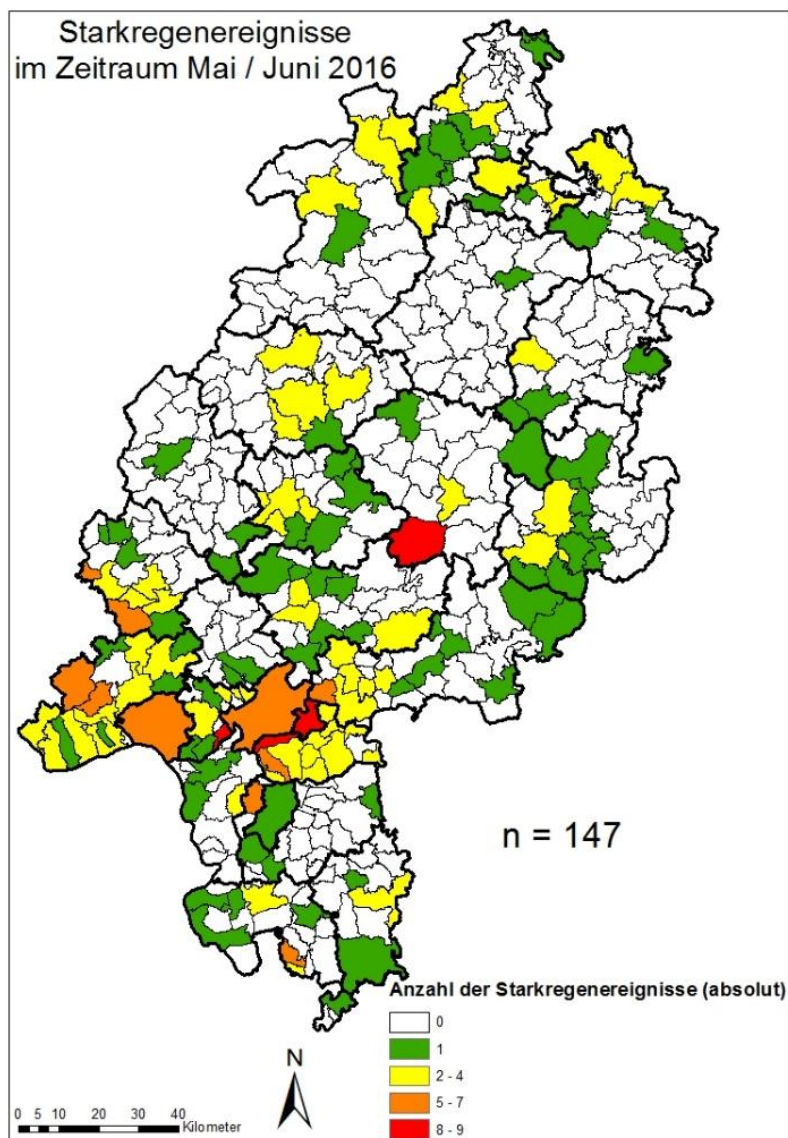


Abbildung 29: Absolute Anzahl der Starkregenereignisse in den Monaten Mai und Juni 2016

Der Lahn-Dill-Kreis hat über den gesamten Zeitraum betrachtet nur wenige Starkregen-Einträge. Trotzdem muss an dieser Stelle noch auf ein außergewöhnliches Ereignis in diesem Landkreis hingewiesen werden, welches für Schlagzeilen gesorgt hatte. Dieses extreme Niederschlags-Abfluss-Ereignis trat am 17.09.2006 im Kuhbach auf, der durch die Gemeinde Haiger im westlichen Teil des Lahn-Dill-Kreises fließt. Die Landesmessnetzstation Haiger meldete an jenem Tag eine Niederschlagsmenge von 161 l/m<sup>2</sup>, davon 150 l/m<sup>2</sup> innerhalb von nur vier Stunden. Das Bächlein stieg infolgedessen um ca. 5 Meter an (Hübener et al. 2019: 19). Dieses Starkniederschlags-Ereignis ist auch in der Starkregen-Datenbank dokumentiert und lässt sich in der pro 100 000 Einwohner Darstellung des Jahres 2006 erkennen (Abb. 30).

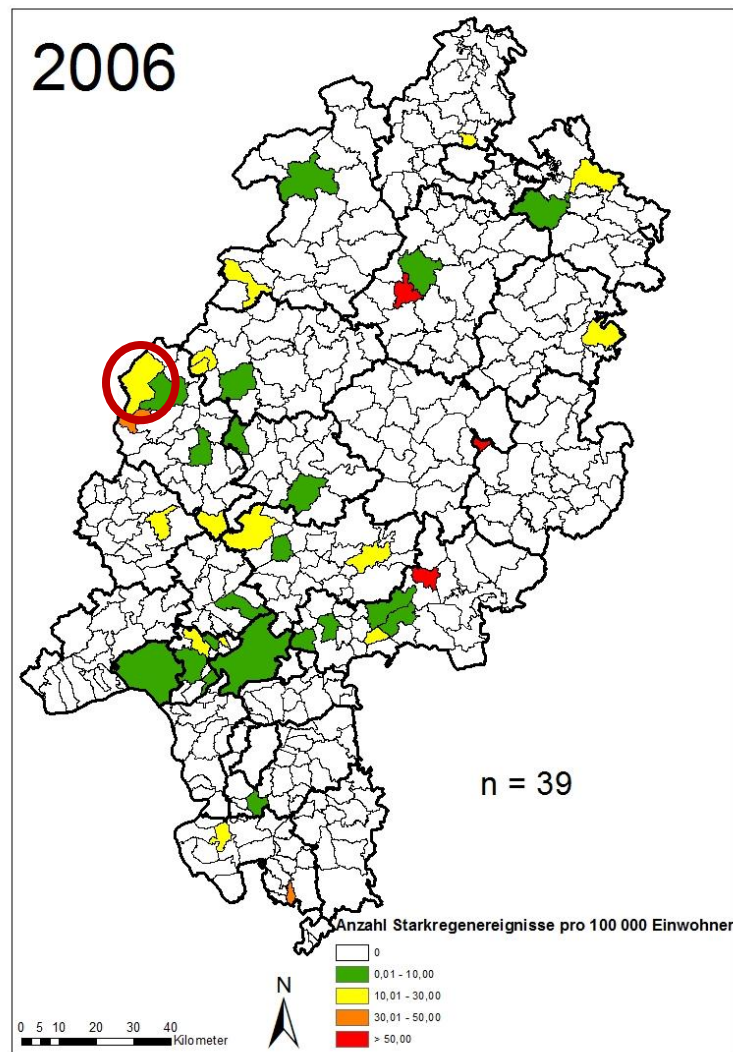


Abbildung 30: Lage der Gemeinde Haiger in der pro 100 000 Einwohner Darstellung des Jahres 2006

## **7. Diskussion und Bewertung des Datensatzes**

Im Diskussionskapitel werden die Ergebnisse besonders im Hinblick auf die Forschungsfragen und Forschungsziele interpretiert und in Bezug zu bestehender Literatur gesetzt. Die Beurteilung, was die Ergebnisse überhaupt bedeuten, mündet in einer abschließenden Bewertung des Datensatzes.

### **7.1 Vergleich der Ergebnisse mit bestehender Literatur**

Der Jahresverlauf der Starkregen-Ereignisse bzw. die Starkniederschlagssaison, die sich aus den Einträgen der Starkregen-Datenbank ergeben hat (Abb. 14), ähnelt im Wesentlichen der von Martin Gudd in seiner Dissertation. Gudd (2003: 232 f.) beschreibt seine Ergebnisse folgendermaßen (vgl. Abb. 31): „Signifikante Starkregenereignisse gibt es vor allem im Frühsommer in den Nachmittagsstunden. In den letzten Apriltagen ist bereits ein Anstieg von Starkregenschadensereignissen zu verzeichnen, der sich im Mai fortsetzt, wobei dann auch erste örtlich signifikante Fälle dazukommen. Während der Kleinen Eisheiligen kommt es vorübergehend zu einem Rückgang, bevor im Juni schon in den ersten Tagen das Jahresmaximum der Starkregenereignisse erreicht wird.“

In dieser Arbeit wurde der Jahresverlauf um das „winterliche Zweit-Maximum“ weitestgehend bereinigt. Auch Annika Brieber entdeckte in ihrer Masterarbeit diesen zweiten Peak im Winter: „Der mittlere Jahresgang der Niederschläge weist ein winterliches und sommerliches Maximum sowie geringere Werte im Frühjahr und Herbst auf. [...] Dass es sich dabei [beim winterlichen Maximum] hauptsächlich um Dauerregen und nicht um Starkregenereignisse handelt, wird bei der Untersuchung der mittleren Tagesmaxima deutlich – die entsprechende Kurve zeigt kein winterliches Maximum. Während der Sommermonate werden erwartungsgemäß die höchsten Minutenwerte erreicht [...].“ (Brieber 2018: 34 f.) (Abb. 32).

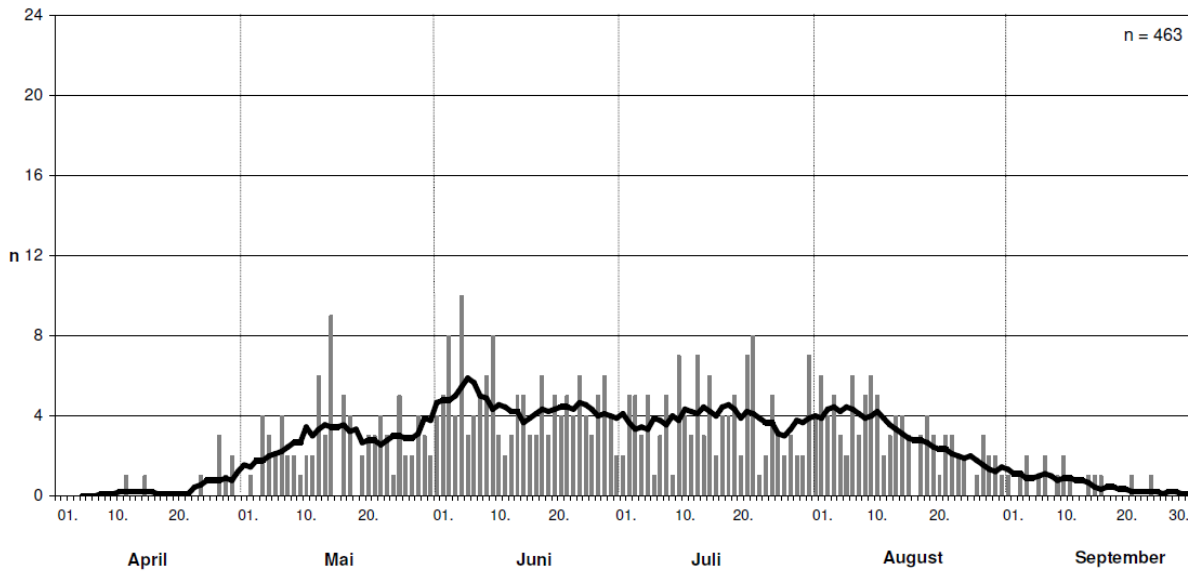


Abbildung 31: Jahresverlauf von Starkregenereignissen in Südhessen im Zeitraum 1881 - 1980. Die Kurve stellt den Mittelwert über 9 Tage dar. (Gudd 2003: 235)

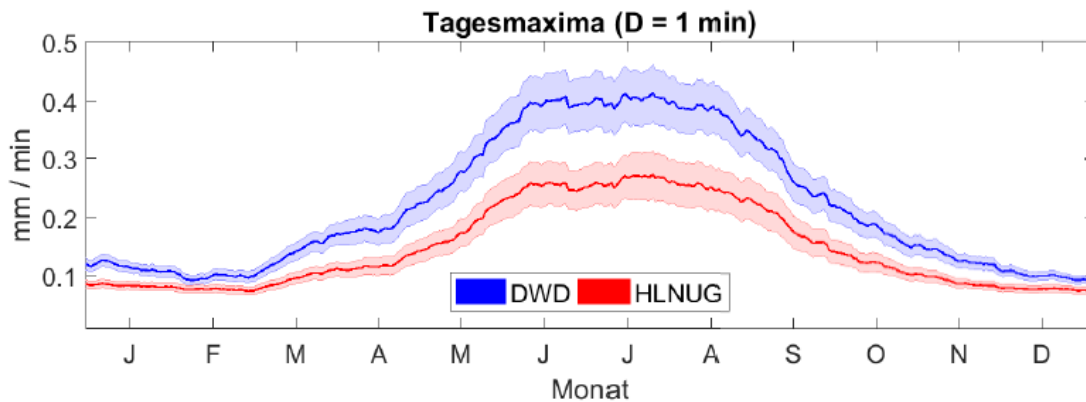


Abbildung 32: Jahresgang der Tagesmaxima, durchgezogene Linie = 30-tägiges gleitendes Mittel über den Zeitraum 2000-2016 und alle DWD- und HLNUG-Stationen, schattiert = Vertrauensbereich (Brieber 2018: 35)

Ein uneinheitliches Bild liefert der Vergleich der Einzeljahre mit denen des Zeitraums 2007 – 2011 aus der Dissertation von Kutschker. In beiden Verläufen ist 2011 als „Hot-Spot-Jahr“ erkennbar mit einer höheren Anzahl an Starkregenereignissen als die vorigen Jahre. Während aber bei Kutschker die Anzahl von 2007 - 2010 abnimmt (Abb. 33), ist es bei den Ergebnissen dieser Arbeit genau umgekehrt (Abb. 19). Die Anzahl in diesem Zeitraum steigt an. Da der Anstieg 2011 jeweils



sehr deutlich ausfällt, kann davon ausgegangen werden, dass es in diesem Jahr tatsächlich mehr Starkregen gegeben hat. Die unterschiedliche Entwicklung im Zeitraum davor könnte einerseits auf die unterschiedliche Größe des jeweiligen Untersuchungsgebiets zurückzuführen sein. Die Entwicklung im Rhein-Main-Gebiet, die Kutschker untersucht hat, muss nicht zwangsläufig auf ganz Hessen übertragbar sein. Andererseits muss auch die jeweilige Datengrundlage betrachtet werden. Gerade weil bei dieser Arbeit für die ersten Jahre des Untersuchungszeitraums 2006 – 2019 recht wenige Daten vorliegen und sich die Einzeljahre auch hinsichtlich der Anzahl an Starkregen-Ereignissen teilweise nur wenig unterscheiden (z.B. 2008: 85, 2009: 88) ist hier große Vorsicht geboten bei der Interpretation der Entwicklung bis 2011! Denn Kutschker besitzt für einen recht kurzen Untersuchungszeitraum und ein recht kleines Untersuchungsgebiet vergleichsweise viele Daten (6646 Starkregeneinsätze). Durch seinen Zugriff auf Original-Feuerwehrdaten erhielt er eine deutlich professionellere Datenlage.

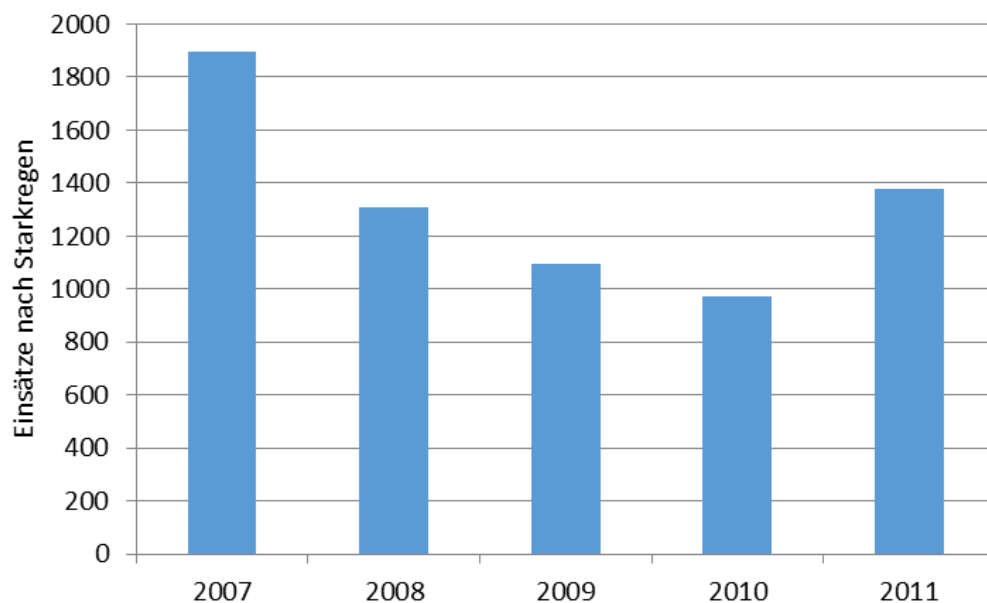


Abbildung 33: Jährliche Anzahl von Feuerwehreinsätzen nach Starkregen in Rhein-Main (Kutschker 2018: 98)

Interessante Einblicke liefert der Vergleich der räumlichen Schwerpunkte. Große Niederschlagsmengen oberhalb des Gesamtdurchschnitts und entsprechend viele Feuerwehreinsätze verzeichnen vor allem Bereiche des Hochtaunuskreises, der Landkreis Offenbach und Darmstadt-Dieburg sowie der östliche Main-Kinzig-Kreis (Kutschker 2018: 55). Die Verteilung von „Hot-Spot-Regionen“ zeigt dabei eine relativ große räumliche Variation, kann aber

aufgrund des kurzen Betrachtungszeitraums von Kutschker nicht als statistisch gesichert gelten (Tab. 2 und Abb. 34). Die genannten Gebiete stimmen mit den räumlichen Ergebnissen dieser Arbeit weitestgehend überein (Abb. 23). Das verstärkte Zentrum des Rhein-Main-Gebiets rund um Frankfurt, Offenbach und Wiesbaden inklusive den Gemeinden im Vordertaunus und im östlichen Main-Kinzig-Kreis besitzt eine höhere Anzahl an Starkregen-Einträgen als die ländlicheren Randgebiete. Der Raum Offenbach ist in Kutschkers Ergebnissen jedoch deutlich überrepräsentiert. In seinem untersuchten Zeitraum waren die Stadt und der dazugehörige Landkreis also besonders häufig von Starkregen betroffen. Diese Auffälligkeit ist in den Ergebnissen dieser Arbeit wegen der schlechteren Datengrundlage zu dieser Zeit nicht zu finden.

Tabelle 2: Starkregeneinsätze nach Landkreisen (Kutschker 2018: 100)

Landkreis / kreisfreie Stadt	Einsätze	Anteil %
Darmstadt-Dieburg	560	8,9
Frankfurt am Main	732	9,9
Groß Gerau	617	8,1
Hochtaunus	655	10,1
Kreis Offenbach	1796	32,1
Main-Kinzig	657	9,4
Main-Taunus	340	4,5
Offenbach	340	4,5
Rheingau-Taunus	380	5
Wetterau	93	1,2
Wiesbaden	476	6,3
<b>Total</b>	<b>6646</b>	<b>100</b>

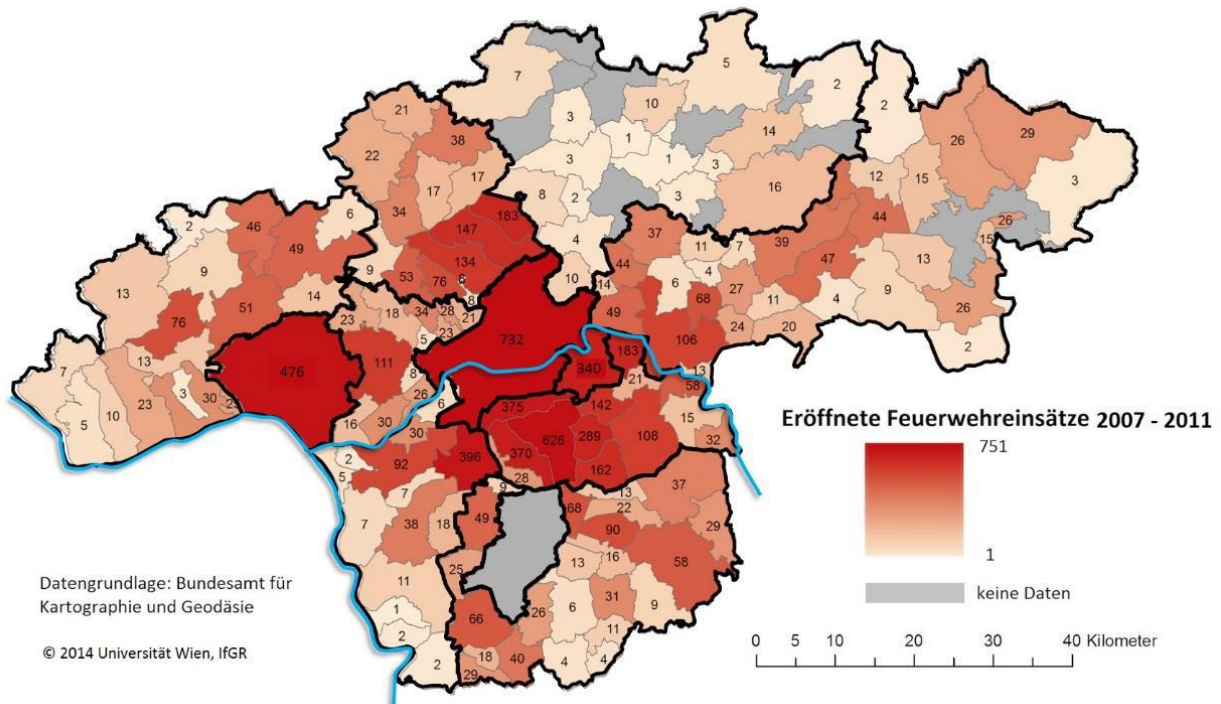


Abbildung 34: Gesamteinsätze nach Starkregen im Zeitraum 2007 - 2011 im Rhein-Main-Gebiet (Kutschker 2018: 108)

Eine Eigenschaft, die alle Klassifikations-Karten und fast alle Einzeljahres-Karten gemeinsam haben und auch bei den KLIMPRAX-Starkregen-Karten zu finden ist, ist die insgesamt recht gleichmäßige Verteilung oder das „Streuselkuchen-Muster“ der Starkregenereignisse über Hessen. Werden Schwerpunkte außen vor gelassen, grenzen häufig einzelne Gemeinden mit hohen Werten an Gemeinden mit niedrigeren Werten oder Null-Werten und zwar egal, welcher Teil Hessens betrachtet wird. Diese Erkenntnis spiegelt die Natur von Starkregen wider. Starkregen tritt nämlich, wie in Kapitel 1.1 erklärt, in der Regel nicht flächendeckend auf, wie beispielsweise Sturmereignisse, sondern punktuell und ist überall möglich. Es mag Regionen geben, die aufgrund ihrer Lage häufiger getroffen werden, aber es gibt in Deutschland bzw. Hessen keine Region, die sicher vor Starkregen ist. Die Streuselkuchen-Verteilung kommt bei dieser Arbeit sogar noch besser hervor, da sie von einer deutlich besseren Abdeckung der Gemeinden profitiert. Eine gleichmäßige Abdeckung hat außerdem den Vorteil, dass ein Vergleich zwischen Landkreisen oder Gemeinden einfacher möglich wird oder in einzelnen Jahren auch großräumige Ereignisse wie im Frühsommer 2016 erkennbar werden. Dennoch sollte nicht unerwähnt bleiben, dass es ca. 80 Gemeinden gibt, zu denen sich keinerlei Einträge in der Starkregen-Datenbank finden lassen. Ob es in diesen Gemeinden wirklich keine Starkregen-Ereignisse gab oder nur nichts gemeldet wurde, weil keine Schäden entstanden sind und

entsprechend keine Feuerwehreinsätze nötig waren oder etwaige Schäden bzw. Begleiterscheinungen von Starkregen nicht dokumentiert wurden, kann mit den hier getätigten Analysen nicht abschließend beurteilt werden.

## **7.2 Problem bei Bereinigung der Klassifikation 1**

Diskussionswürdig ist außerdem der Umgang mit der Klassifikation 1. Zur Erinnerung: Rund die Hälfte aller Einträge in der Starkregen-Datenbank wurde Klassifikation 1 zugeordnet, sodass nicht sicher war, ob bei diesen tatsächlich Starkregen die Ursache war. Mit einer Bereinigung sollte Klarheit geschaffen werden. Die Bedingung, dass Einträge in Klassifikation 1 für die Analysen verwendet wurden, war, dass diese Einträge mindestens zwei Gemeinden am selben Datum umfassen. Dadurch konnte tatsächlich ein Großteil der Klassifikation 1 in die Analysen einfließen. Ein neues Problem entstand durch die Bereinigung jedoch: Es betrifft die Meldefrequenz bzw. die Häufigkeit der Dokumentation von Starkregenereignissen. Es ist bekannt, dass vor allem zu Beginn des Untersuchungszeitraums von 2006 – 2009 insgesamt nur wenige Kommunen Meldungen vorzuweisen hatten. War nun eine Gemeinde mit Meldung umgeben von Gemeinden ohne Meldungen, so flog diese aus weiteren Untersuchungen heraus. Angenommen es fand dort tatsächlich ein Starkregen-Ereignis statt und es wurde aber nur in dieser einen Gemeinde dokumentiert, so taucht dieses Starkregen-Ereignis aufgrund der Bereinigung nicht in den Analysen auf. Dass dieser Effekt besonders Jahre mit einer niedrigen Anzahl an Einträgen betrifft, zeigt Abbildung 18. Jahre mit ohnehin schon vielen Einträgen gewinnen durch die Bereinigung mehr Einträge hinzu als dass sie ungültige verlieren, in Jahren mit wenigen Einträgen ist es umgekehrt. Um sicher zu gehen, dass dieses Problem umgangen wird, müssten alle Einträge in Klassifikation 1 einzeln anhand ihrer Quellen und/oder Wetterdaten überprüft werden, was jegliche Kapazitäten sprengen würde. So kann die Bereinigung der Klassifikation 1 trotzdem als richtige Vorgehensweise im Rahmen dieser Arbeit angesehen werden. Denn unterm Strich wurden dadurch mit großer Wahrscheinlichkeit mehr Starkregen-Einträge ausfindig gemacht, mit denen weitergearbeitet werden konnte, als möglicherweise Starkregen-Ereignisse durch das oben beschriebene Problem „unsichtbar“ gemacht.

### 7.3 Verwendung zweier Karten-Varianten

Bei der räumlichen Analyse ergaben sich in urbanen Räumen künstliche Maxima bei der absoluten Anzahl von Starkregen-Ereignissen. Eine vermutlich bessere Dokumentation und eine größere Fläche, die von Starkregen betroffen ist, im Vergleich zu den meisten ländlichen Gemeinden dient als Erklärung für dieses Phänomen. Zur Abschwächung dieser künstlichen Maxima kann die Dichte der Starkregen-Ereignisse als Kenngröße herangezogen werden. Dies kann, wie im Falle des KLIMPRAX-Starkregen-Projekts, auf die Fläche bezogen sein, also zum Beispiel die Anzahl der Ereignisse jeder Gemeinde pro 10 Quadratkilometer (Kreklow et al. 2019: 21 f.). In dieser Arbeit wurde sich aus rein praktischen Gründen für die Anzahl der Starkregen-Ereignisse jeder Gemeinde pro 100 000 Einwohner entschieden, denn so wird dem Leser bewusst, dass ein und dasselbe Starkregen-Ereignis in einer kleinen Gemeinde prozentual mehr Einwohner betreffen kann als in einer größeren Stadt. Ob die Dichte pro Fläche oder pro Einwohner berechnet wird, spielt in den Ergebnissen letztendlich aber keine große Rolle, da sich diese ohnehin ähneln werden.

Wie aus den Ergebnissen vorgeht, unterscheiden sich die Karten mit absoluten Werten von denen der pro 100 000 Einwohner Berechnung teilweise stark. Wie kann also eine Gemeinde mit Blick auf beide Karten-Varianten konkret herausfinden, wie stark sie von Starkregen betroffen ist/war? Für diese Bewertung sind beide Karten notwendig! Fragt beispielsweise die Stadt Wiesbaden an, die auf der Karte mit absoluten Werten rot eingefärbt ist, bei der pro 100 000 Einwohner Darstellung dagegen grün, so liegt die Wahrheit dazwischen! Die Stadt scheint zwar oft von Starkregen getroffen worden zu sein, aufgrund ihrer Größe ist die Anzahl aber nicht ungewöhnlich. Anders sähe die Bewertung aus, wenn sie in der „Dichte-Karte“ zum Beispiel orange eingefärbt wäre. Dann wäre das eine auffallend hohe Anzahl an Starkregen-Treffern, die sich nicht allein mit der Größe der Stadt erklären lässt. An dieser Stelle sei auf die Gemeinde Eltville bei Abbildung 23 oder die Nachbargemeinden Weilmünster und Weinbach in Abbildung 26 hingewiesen! Wie diese Beispiele aus dem Ergebnis-Kapitel zeigen, kann ein Vergleich beider Karten-Varianten auf weitere bzw. neue Auffälligkeiten oder Schwerpunkte hinweisen, die bei der Betrachtung von nur einer Karte womöglich unentdeckt geblieben wären. Natürlich kommt es auch immer auf die individuelle Fragestellung an, ob ein Vergleich beider Karten oder nur jeweils einer Karte von Nutzen ist. Will eine Stadt wissen, wie viele Starkregen-Ereignisse es in den letzten 10 Jahren im Stadtgebiet gab, so ergibt es mehr Sinn, sich die absoluten Werte anzusehen. Will eine Gemeinde aus einem ländlichen Teil Hessens wissen, ob sie mehr von Starkregen betroffen ist, als die

anderen Gemeinden im selben Landkreis, dann lohnt sich ein Blick auf die pro 100 000 Einwohner Karten.

#### **7.4 Bewertung des Datensatzes**

Die Ergebnis-Präsentation und deren Diskussion haben gezeigt, dass die Einträge in der Starkregen-Datenbank relativ gut dafür geeignet sind, um zeitliche und räumliche Schwerpunkte von Starkregen in Hessen herauszufinden. Dies gilt insbesondere für die Jahre 2011 – 2018, die aufgrund der recht hohen Datenverfügbarkeit eine interannuelle Variabilität widerspiegeln. Der typische Jahresverlauf von Starkregen mit dem Anstieg ab dem späteren Frühjahr, dem Peak im Sommer und dem Abflachen zum Herbst hin, stimmt mit den Ergebnissen der bisherigen Forschung überein. Selbst Einzelereignisse mit einer Dauer von nur wenigen Stunden können mit den Starkregen-Einträgen nachvollzogen werden und sich anhand von Wettermessdaten überprüfen lassen. Räumliche Schwerpunkte entstehen aufgrund tatsächlich stattgefundener Starkregen-Ereignisse und weniger aufgrund steigender Internetnutzung im Zeitverlauf oder fleißiger Dokumentation einzelner Feuerwehren.

Jedoch besitzt der zuletzt genannte Punkt keine Allgemeingültigkeit! Die Entwicklung im Laufe der Jahre ist sehr wohl von einer steigenden Internetnutzung und dort archivierter Feuerwehreinträge geprägt. Das gilt besonders für die Jahre bis 2010. Das Problem einer generell besseren Einsatz-Dokumentation in größeren Städten wurde mit der Verwendung der pro 100 000 Einwohner Darstellungen behoben. Ohne diese Vorgehensweise würden die Einträge in der Starkregen-Datenbank ein verzerrtes Bild der Realität abgeben. Auch der beschriebene Umgang mit den Einträgen aus Klassifikation 1 gibt keine Garantie auf hundertprozentige richtige Einordnung der Daten. Eine Unterscheidung, ob Gemeinden ohne jegliche Einträge tatsächlich von keinem Starkregen (mit Schäden) getroffen wurden oder nur nicht dokumentiert wurden, ist mit den hier vorliegenden Daten ebenfalls nicht möglich.

Ein gewisses „Rauschen“ ist bei der Analyse von größeren Datensätzen aber zu erwarten und liegt hier im Normalbereich, der vernachlässigbar ist. Für die Fragestellungen im Rahmen dieser Masterarbeit, im Speziellen im Hinblick auf zeitliche und räumliche Starkregen-Schwerpunkte, ist der Datensatz jedenfalls gut nutzbar. Bei genauerer Betrachtung stößt er aber teilweise an seine Grenzen.

## 8. Fazit und Ausblick

Starkregenereignisse in Hessen wurden in der bisherigen Forschung schon mehrmals untersucht. Die vorliegende Arbeit sollte prüfen, ob auch mit einfachen Feuerwehr-Einsatzdaten zu Starkregen zeitliche und räumliche Schwerpunkte abgebildet werden können. Besonders gut gelang das bei der zeitlichen Analyse der Daten. Die Ergebnisse zeigen einen typischen Jahresverlauf der Starkregenereignisse, wie er auch in anderen Untersuchungen zum Vorschein tritt. So steigt die Zahl der Starkregenereignisse ab April deutlich an, erreicht im Juni ihren Höhepunkt und nimmt danach wieder ab. Auch eine interannuelle Variabilität konnte mit den hier zur Verfügung stehenden Daten erkannt werden. Dies gilt besonders für den Zeitraum 2011 – 2018. Als Hot-Spot-Jahre zeigen sich 2014, 2016 und 2018, ein ausdrückliches Low-Spot-Jahr ist dagegen 2015. Für den Zeitraum vor 2011 ist die Datenlage nicht ausreichend genug, um Schlüsse ziehen zu können und deutlich stärker von steigender Internetnutzung und -präsenz der Feuerwehren geprägt.

Die räumliche Analyse zeigt mit ihrem „Streuselkuchen-Muster“ ebenfalls eine typische Verteilung von Starkregenereignissen. In absoluten Zahlen kann das stark bevölkerte und versiegelte Rhein-Main-Gebiet sowie die Stadt Marburg als Schwerpunkt gesehen werden. In der Darstellung pro 100 000 Einwohner liegen die Schwerpunkte eher im Rheingau und im östlichen Teil des Bundeslandes. Die räumlichen Ergebnisse spiegeln die wichtige Rolle von Topographie und Landnutzung bei der Schadensstärke von Starkregenereignissen ganz gut wider. Stark versiegelte Gebiete mit viel Infrastruktur, wie in Städten, sowie Regionen, die von steilen Hängen oder bergiger Landschaft geprägt sind, sind Schäden durch Starkregen gegenüber anfälliger, die häufig in Feuerwehr-Einsätzen enden. Insbesondere für die letzten Jahre des Untersuchungszeitraums ist die Datengrundlage sogar für eine Analyse von Einzelereignissen auf Zeitskalen von Stunden bis wenigen Tagen geeignet. So kann herausgefunden werden, wo an welchem Datum besonders viele Starkregenereignisse aufgetreten sind und weitere Details dazu entsprechenden Wettermessdaten entnommen werden.

Eine größere Anzahl von Feuerwehr-Einsatzdaten, wie in der Starkregen-Datenbank vorhanden, kann also zeitliche und räumliche Schwerpunkte von Starkregenereignissen gut darstellen. Zwar gibt es auch Hinweise auf den Einfluss von lokalen Meldehäufigkeiten bzw. höheren Einsatz-Dokumentationen der Feuerwehren, wie in Eltville oder Marburg, insgesamt werden die Ergebnisse aber davon nicht dominiert. Die Ergebnisse dieser Arbeit decken sich gut mit denjenigen des KLIMPRAX-Starkregen-Projekts und auch mit denen weiterer Literatur. Das betrifft vor allem den Jahresverlauf von Starkregen als auch die „Streuselkuchen-Verteilung“.

Keine Antwort kann mit den vorgenommenen Analysen auf die Frage gegeben werden, ob Gemeinden ohne Daten tatsächlich von keinen Starkregenereignissen getroffen wurden oder nur nichts gemeldet bzw. dokumentiert wurde. Auch um den richtigen Umgang mit den Klassifikationen kann gestritten werden und zeigt die Grenzen der hier getätigten Forschung auf.

Die Untersuchung knüpft an das KLIMPRAX-Starkregen-Projekt an. Durch eine bessere Datengrundlage konnte bei den Analysen jedoch noch mehr in die Tiefe gegangen und auf zeitlichen und räumlichen Skalen noch detailliertere Auswertungen möglich werden als beim KLIMPRAX-Starkregen-Projekt. Somit kann diese Arbeit als Ergänzung dazu dienen. Allgemein lassen sich die Untersuchungsergebnisse gut in die bisherige Forschung zu diesem Thema integrieren, da sie teilweise dessen Ergebnisse bestätigen, sich aber auch neue Erkenntnisse herausstellen lassen.

Das insgesamt recht gute Resümee der getätigten Analysen erlaubt weitere Beschäftigungen mit der Datenbank. Nicht nur Starkregen, sondern auch andere Wetterextreme wie Flächenbrände, Stürme oder Hochwasser gewinnen durch den Klimawandel an Bedeutung. Für diese sind ebenfalls eine große Zahl an Einträgen in der Datenbank vorhanden, die bisher noch ziemlich unberührt geblieben sind. Die hier erfolgreich verwendete Methodik kann für die Auswertung der anderen Ereignisse in der Datenbank als Grundlage genommen werden. Es erscheint außerdem sinnvoll, die Datenbank weiterzuführen, denn in ihr steckt ein ungeahntes Potenzial. Zur Qualitäts- und Quantitätssteigerung einer solchen Datensammlung wäre es zudem wünschenswert, wenn verbindliche Vorgaben für Feuerwehren zur Einsatz-Dokumentation von Starkregen gemacht werden würden. Dann bräuchte es keine Einteilung in Klassifikationen mehr, mit der schwierigen Frage, wie mit „unsicheren“ Einträgen umgegangen wird, und bei Gemeinden ohne Daten könnte sicher davon ausgegangen werden, dass sie auch wirklich von keinem Starkregen getroffen wurden. Die Ergebnisse solcher Untersuchungen wie dieser können eine große Hilfestellung für Städte und Gemeinden bei der Klimawandelanpassung sein. Das dadurch generierte Wissen aus Vergangenheit und Gegenwart kann dabei helfen, für die Zukunft vorbereitet zu sein. Die Forschung steht auf diesem Gebiet noch am Anfang. Doch wenn schon erste Ergebnisse berücksichtigt werden, können entsprechend eingeleitete Maßnahmen dazu beitragen, Schäden zu vermeiden bzw. zu vermindern und Menschenleben zu retten – sei es in Folge von Starkregenereignissen und begleitenden Sturzfluten oder anderen Wettergefahren.



## Literaturverzeichnis

- ALEXANDER, L. (2016): Global observed long-term changes in temperature and precipitation extremes: A review of progress and limitations in IPCC assessments and beyond. *Weather and Climate Extremes*, 11: 4-16
- BAN, N. ET AL. (2015): Heavy precipitation in a changing climate: Does short-term summer precipitation increase faster? *Geophysical Research Letters*, 42: 1165-1172
- BERNHOFER, C. ET AL. (2017): Starkregenereignisse von 1961 bis 2015. Schriftenreihe des LfULG, Heft 5/2017
- BERG, P. ET AL. (2013): Strong increase in convective precipitation in response to higher temperatures. *Nature Geoscience*, 6: 181–185
- BRIEBER, A. (2018): Statistische Auswertung zeitlich hochaufgelöster Niederschlagsdaten für Hessen. Masterarbeit. Mainz.
- Bundesministerium für Bildung und Forschung (2008): Vorhersage und Management von Sturzfluten in urbanen Gebieten (URBAS). 1-48 (Dokumentseiten). Aachen.
- Deutscher Wetterdienst (o.J.): KOSTRA-DWD. URL:  
[https://www.dwd.de/DE/leistungen/kostra\\_dwd\\_rasterwerte/kostra\\_dwd\\_rasterwerte.html](https://www.dwd.de/DE/leistungen/kostra_dwd_rasterwerte/kostra_dwd_rasterwerte.html)  
(31.08.20)
- FISCHER, E. M. & R. KNUTTI (2016): Observed heavy precipitation increase confirms theory and early models. *nature climate change*, 6: 986-992
- GODERBAUER-MARCHNER, G. ET AL. (2015): Die unterschätzten Risiken „Starkregen“ und „Sturzfluten“. Ein Handbuch für Bürger und Kommunen. Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe. Ausgabe 1. Bonn.
- GUDD, M. (2003): Gewitter und Gewitterschäden im südlichen hessischen Berg- und Beckenland und im Rhein-Main-Tiefland 1881 bis 1980. Eine Auswertung mit Hilfe von Schadensdaten. Dissertation. Mainz.

HLNUG (o.J.): Wetterextreme in Hessen (Wettermesswerte-Portal) URL:

<https://www.hlnug.de/?id=11522> (31.08.20)

HOY, A. ET AL. (2020): Schäden durch Starkregen vermeiden. Unterstützung für hessische Kommunen. Klimawandel in Hessen – Schwerpunktthema. Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie. Wiesbaden.

HUEBENER, H. ET AL. (2019): Extreme Wetterereignisse in Hessen. Klimawandel in Hessen. Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie. Wiesbaden.

IPCC (2014): Klimaänderung 2014: Synthesebericht. Beitrag der Arbeitsgruppen I, II und III zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC) [Hauptautoren, R.K. Pachauri und L.A. Neyer (Hrsg.)]. IPCC, Genf. Deutsche Übersetzung durch Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Bonn, 2016.

Kachelmann GmbH (o.J.): kachelmannwetter (Wettermesswerte-Portal). URL:

<https://kachelmannwetter.com/de/messwerte> (31.08.20)

Kooperation KLIWA (2019): Starkniederschläge. Entwicklungen in Vergangenheit und Zukunft. Kurzbericht.

KREKLOW, J. ET AL. (2019): Ausweisung von starkregengefährdeten Gebieten in Hessen für Planungen zur Gefahrenabwehr auf Landes- und kommunaler Ebene. Abschlussbericht.

KUNDISCH, M. (2015): Großer Wetterrückblick auf ein denkwürdiges Jahr 2015. URL:

<https://wetterkanal.kachelmannwetter.com/grosser-wetter-rueckblick-auf-ein-denkwuerdiges-jahr-2015/> (31.08.20)

KUTSCHKER, T. A. (2018): Auswirkungen von Starkregenerereignissen auf die Gefahrenabwehr im Ballungsraum Rhein-Main und mögliche Anpassungsstrategien im Bevölkerungsschutz. Dissertation. Wien.

- LEFEBVRE, C. ET AL. (2018): Sturmtief Fabienne bringt am 23. September 2018 Sturm und Regen. URL: [https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/stuerme/20180923\\_\\_sturm\\_fabienne.pdf;jsessionid=C462B58F67C B4AAEFBAC001B55C31555.live31091?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/stuerme/20180923__sturm_fabienne.pdf;jsessionid=C462B58F67C B4AAEFBAC001B55C31555.live31091?__blob=publicationFile&v=4)
- LENGFELD, K. ET AL. (2020): Katalogisierung von Starkregenereignissen in Deutschland aus 18 Jahren Radardaten. DWD Newsletter Hydrometeorologie Nr. 23: 13-17
- OG, M. (2020): Plausibilitätsbericht der Ereignisdatenbank über wetterbedingte Feuerwehreinsätze des Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG). Praktikumsbericht (unveröffentlicht).
- OTTE, I. (2019): Mit mehr Daten zu einer besseren Einschätzung der Starkniederschläge. URL: [https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/termine/klimatagung\\_2019\\_beta/programm\\_vortraege/20191126\\_klimatagung\\_iotte.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/termine/klimatagung_2019_beta/programm_vortraege/20191126_klimatagung_iotte.pdf?__blob=publicationFile&v=1) (31.08.20)
- PFAHL, S. ET AL. (2017): Understanding the regional pattern of projected future changes in extreme precipitation. *nature climate change*: 1-6
- SAEVERT, T. (2017): Der große Jahresrückblick 2016. URL: <https://wetterkanal.kachelmannwetter.com/der-grosse-jahresrueckblick-2016/> (31.08.20)
- SCHLENKHOFF, A. ET AL. (2017): Hochwasser und Starkregen. Gefahren – Risiken – Vorsorge und Schutz. HochwasserKompetenzCentrum e.V. Köln.
- Spiegel (2019): Starke Regenfälle durch Tief „Axel“. Autobahn in Hessen gesperrt. URL: <https://www.spiegel.de/panorama/tief-axel-sorgt-mit-gewittern-und-schauern-fuer-ueberschwemmungen-in-deutschland-a-1268422.html> (31.08.20)
- WESTRA, S. ET AL. (2014): Future changes to the intensity and frequency of short duration extreme rainfall, *Rev. Geophys.*, 52: 522–555
- WetterOnline (o.J.): Wetterlexikon. Konvektion. URL: [https://www.wetteronline.de/wetterlexikon?topic=konvektion\\_](https://www.wetteronline.de/wetterlexikon?topic=konvektion_) (31.08.20)

WetterOnline (2015): Jahresrückblick 2015. Hitze, Dürre und wenig Schnee. URL:

<https://www.wetteronline.at/wetterrueckblick/jahresrueckblick-2015-hitze-duerre-und-wenig-schnee-2015-12-31-jr> (31.08.20)

WetterOnline (2016): Jahresrückblick 2016. Warm, trocken und unwetterlastig. URL:

<https://www.wetteronline.at/wetterrueckblick/jahresrueckblick-2016-warm-trocken-und-unwetterlastig-2016-12-31-rj> (31.08.20)

## **Anhang**

Abb. 35 – 45: Absolute Anzahl der Starkregenereignisse (alle Klassifikationen unbereinigt; Einzeljahre im Zeitraum 2006 – 2019 außer 2008, 2015, 2016 und 2018)

Abb. 46 – 57: Anzahl von Starkregeneinträgen pro 100 000 Einwohner (alle Klassifikationen unbereinigt; Einzeljahre im Zeitraum 2006 – 2019 außer 2006, 2016 und 2018)

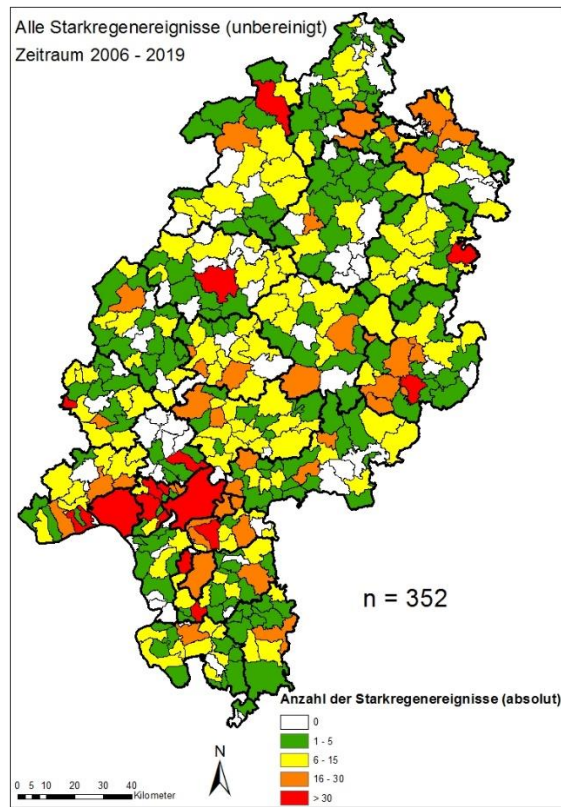


Abbildung 35

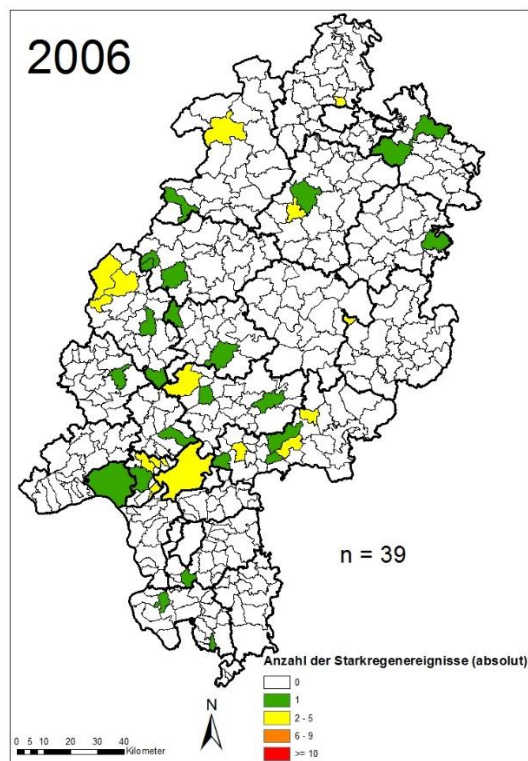


Abbildung 36

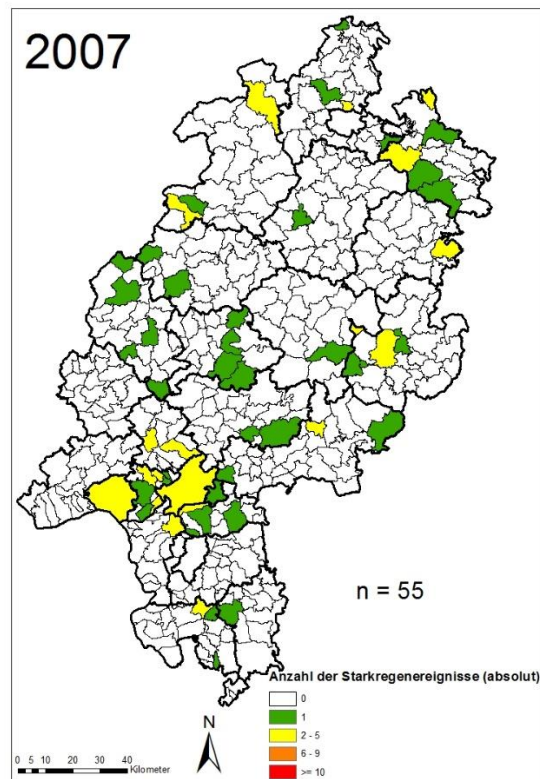


Abbildung 37

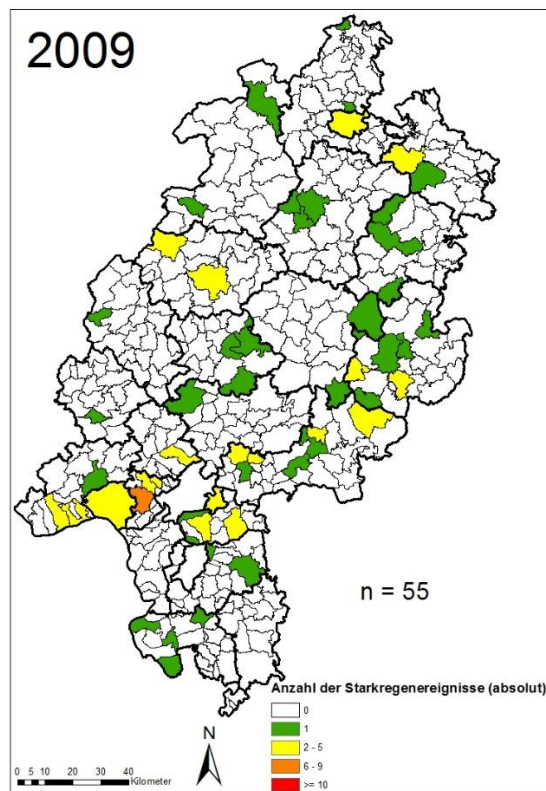


Abbildung 38

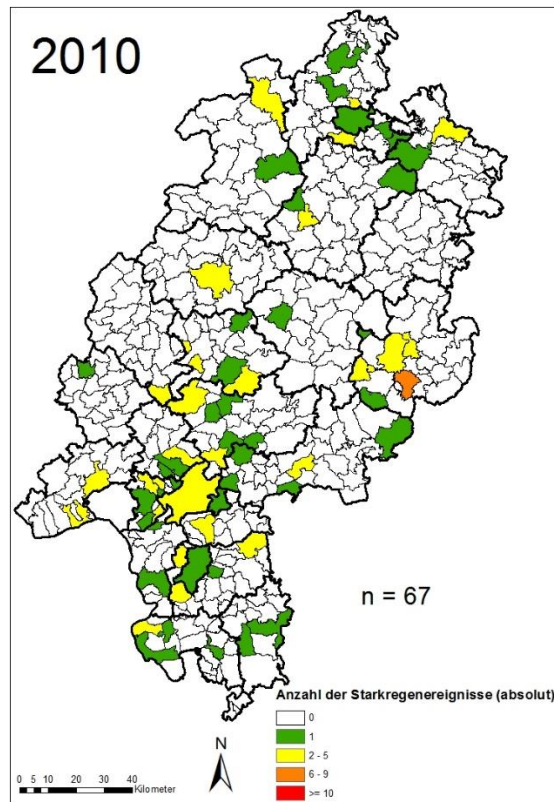


Abbildung 39

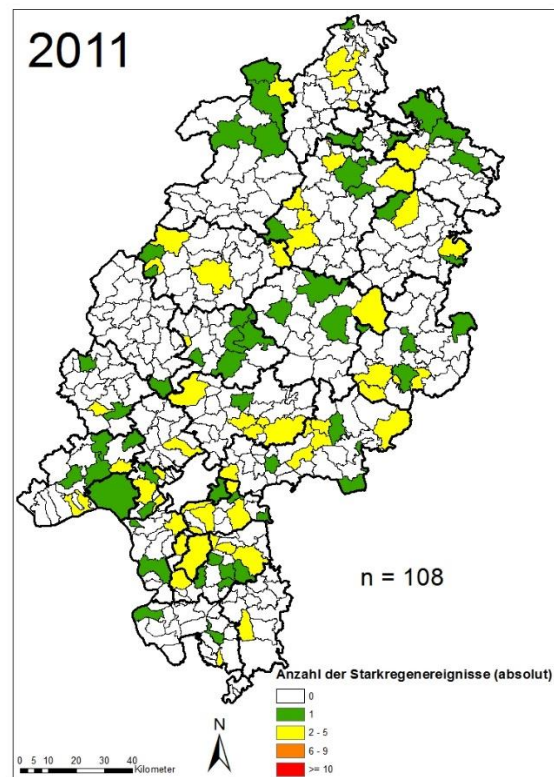


Abbildung 40



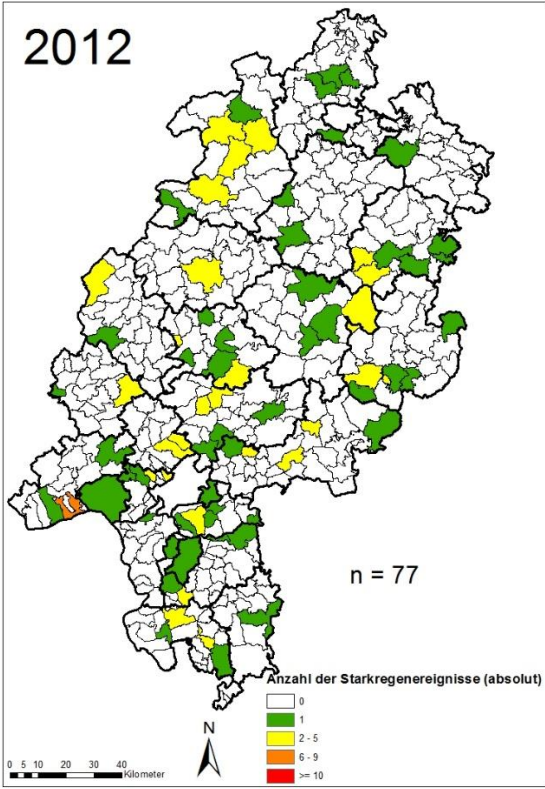


Abbildung 41

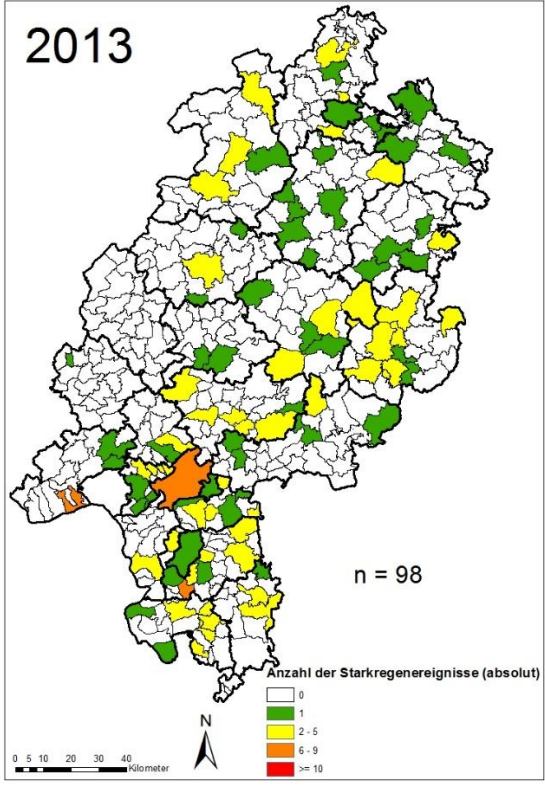


Abbildung 42

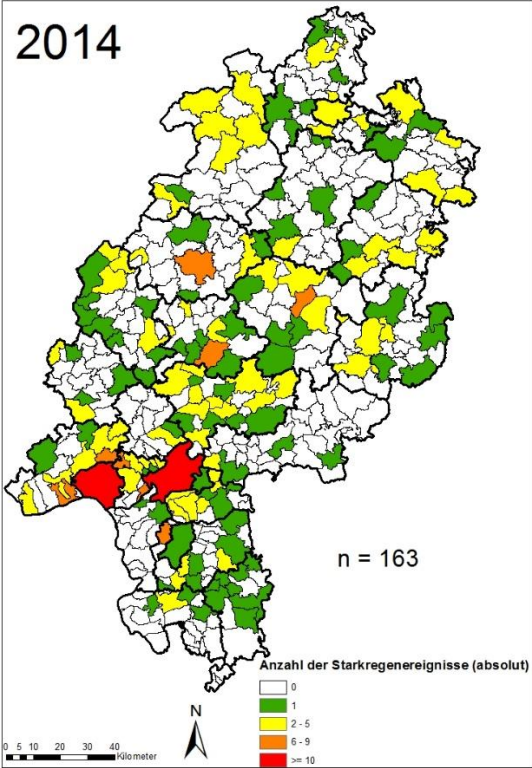


Abbildung 43

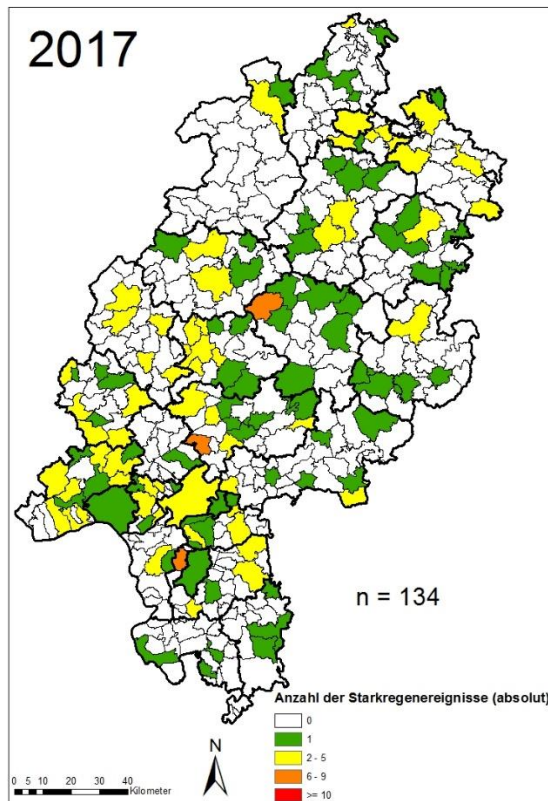


Abbildung 44

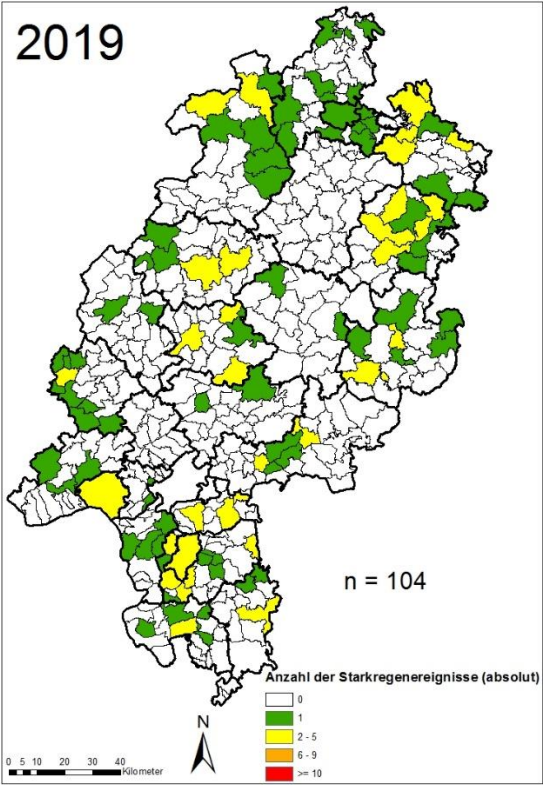


Abbildung 45

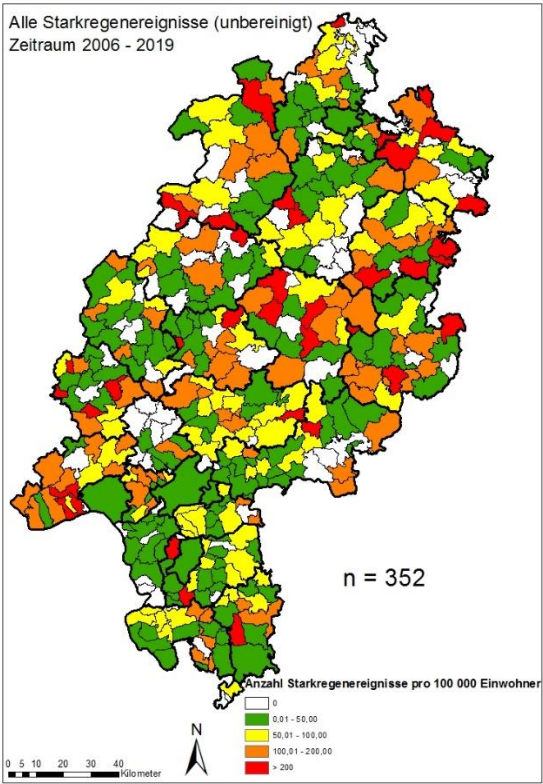


Abbildung 46

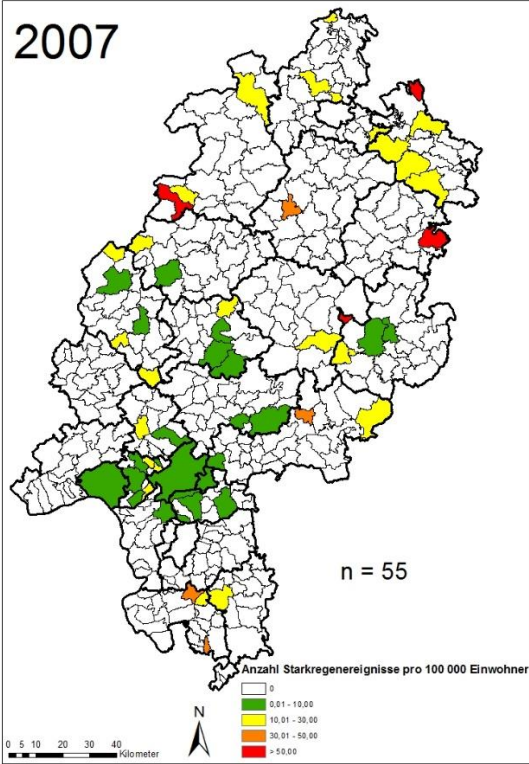


Abbildung 47

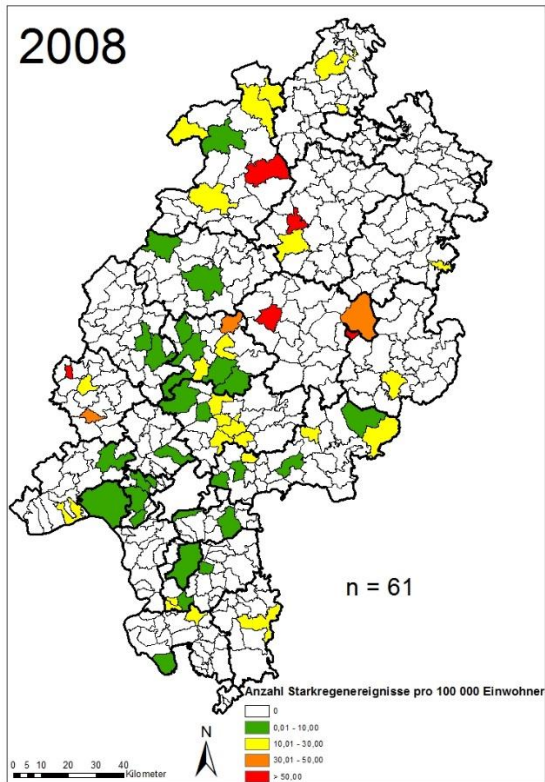


Abbildung 48

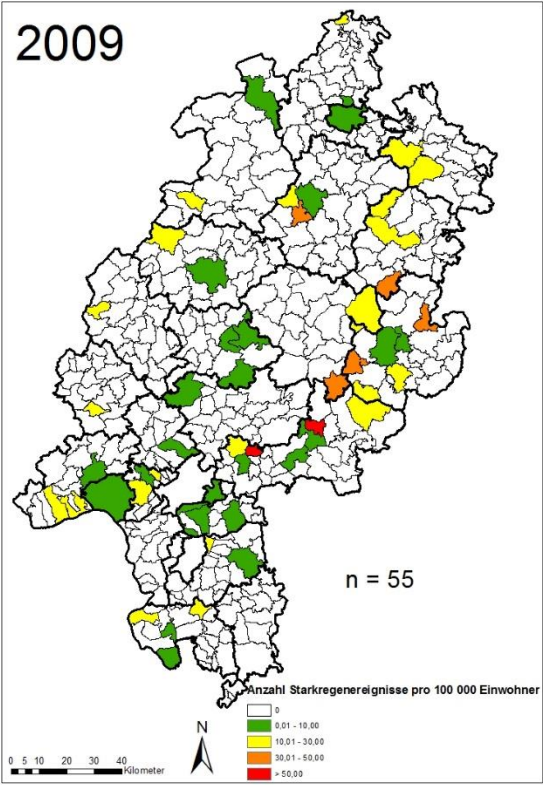


Abbildung 49

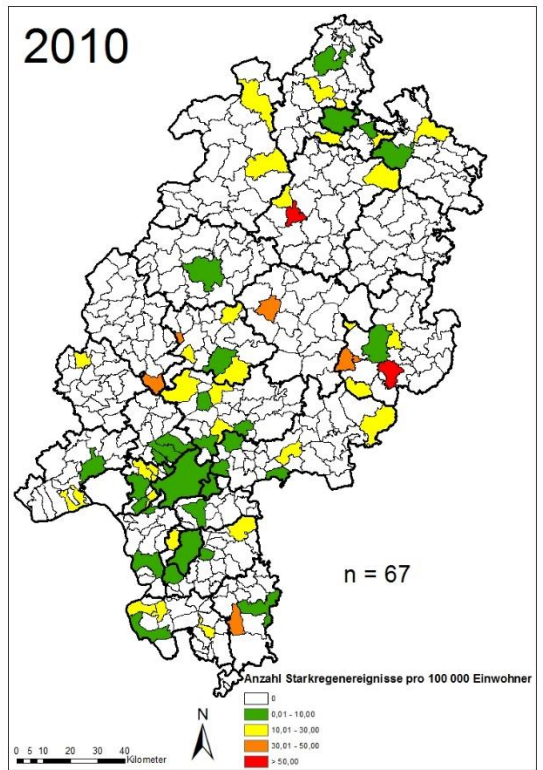


Abbildung 50

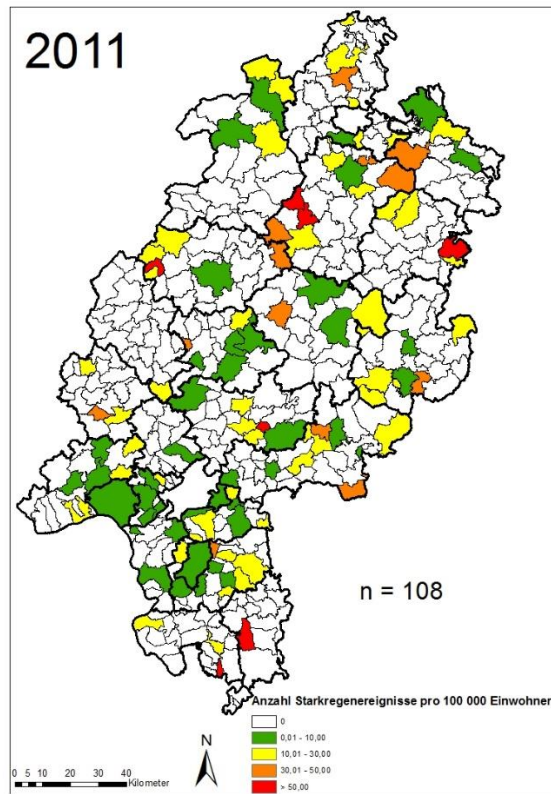


Abbildung 51

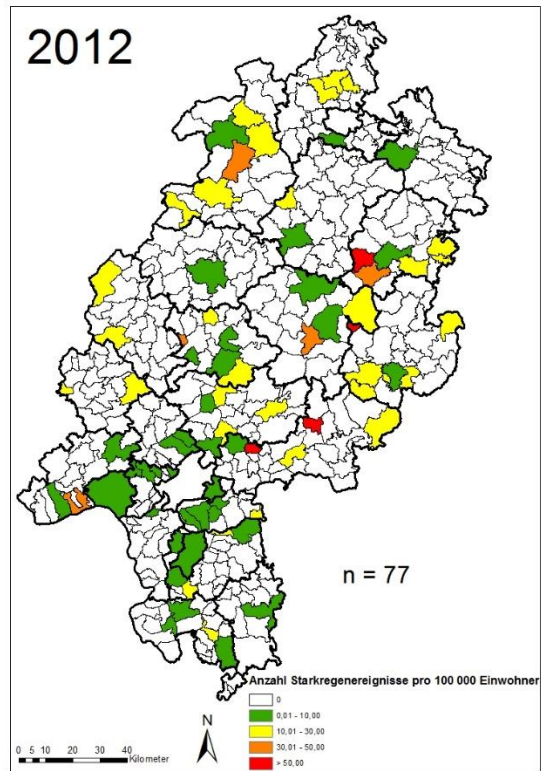


Abbildung 52

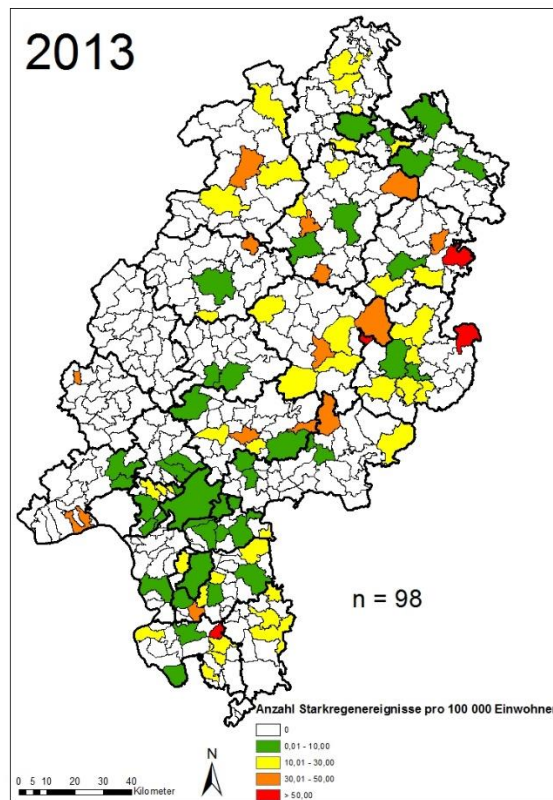


Abbildung 53

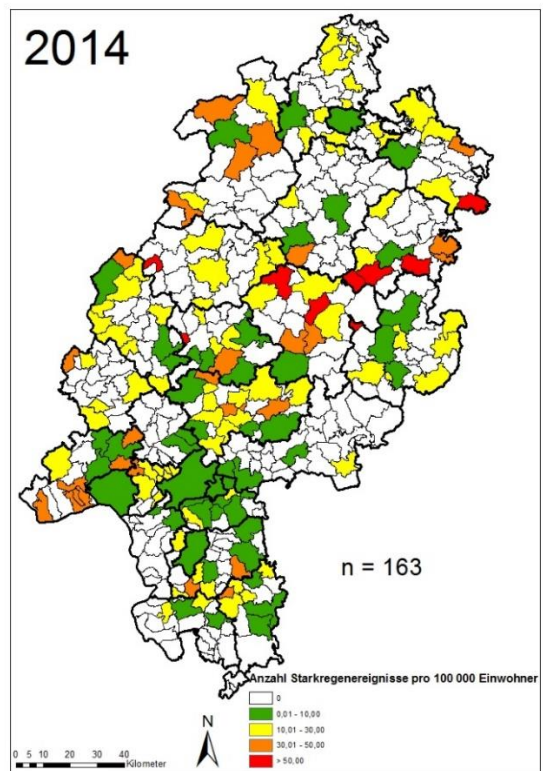


Abbildung 54

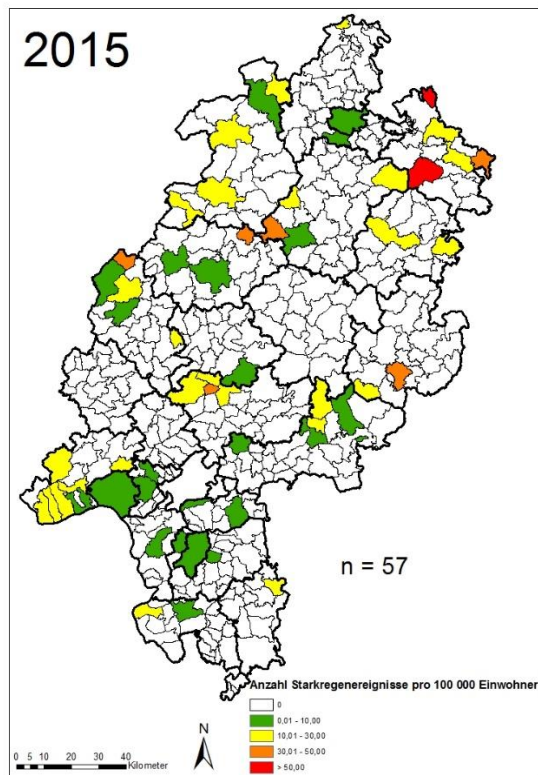


Abbildung 55

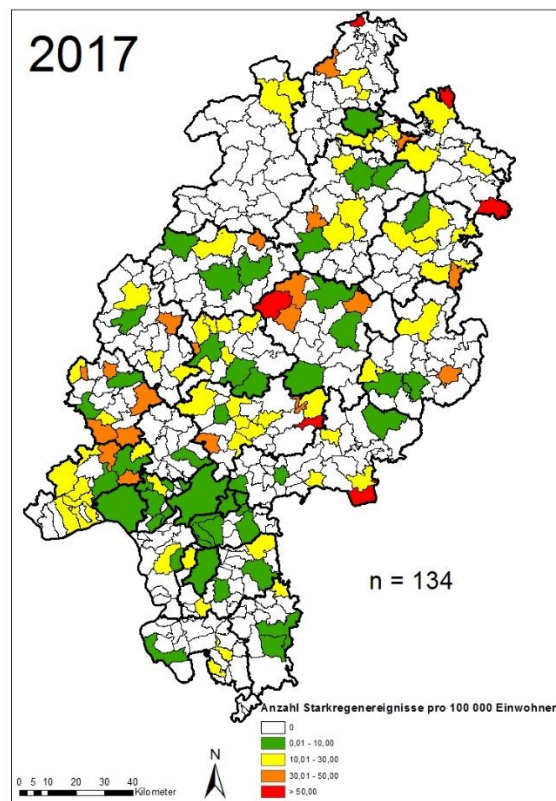


Abbildung 56



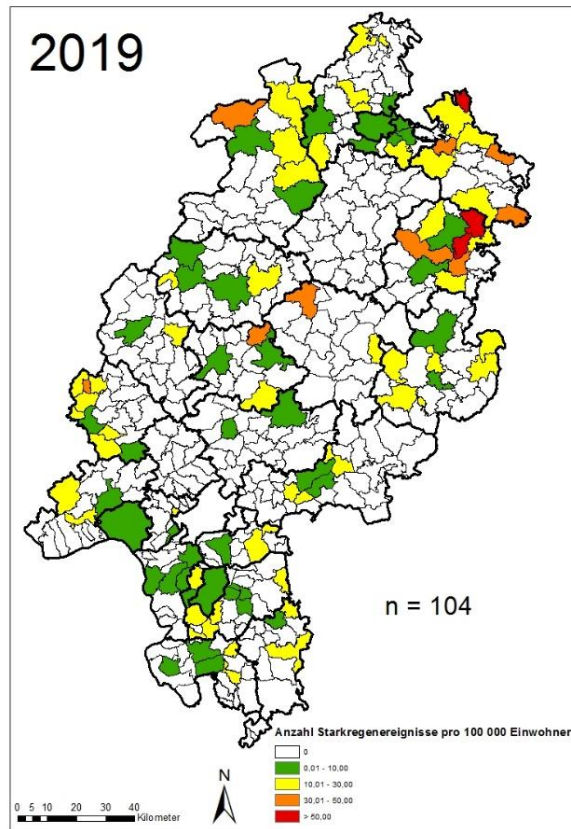


Abbildung 57

## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die im Literaturverzeichnis angegebenen Quellen benutzt habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder noch nicht veröffentlichten Quellen entnommen sind, sind als solche kenntlich gemacht.

Die Zeichnungen oder Abbildungen in dieser Arbeit sind von mir selbst erstellt worden oder mit einem entsprechenden Quellennachweis versehen.

Diese Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch bei keiner anderen Stelle zur Prüfung eingereicht worden.

Frankfurt, den 01.09.20

P. Engel

---

Unterschrift