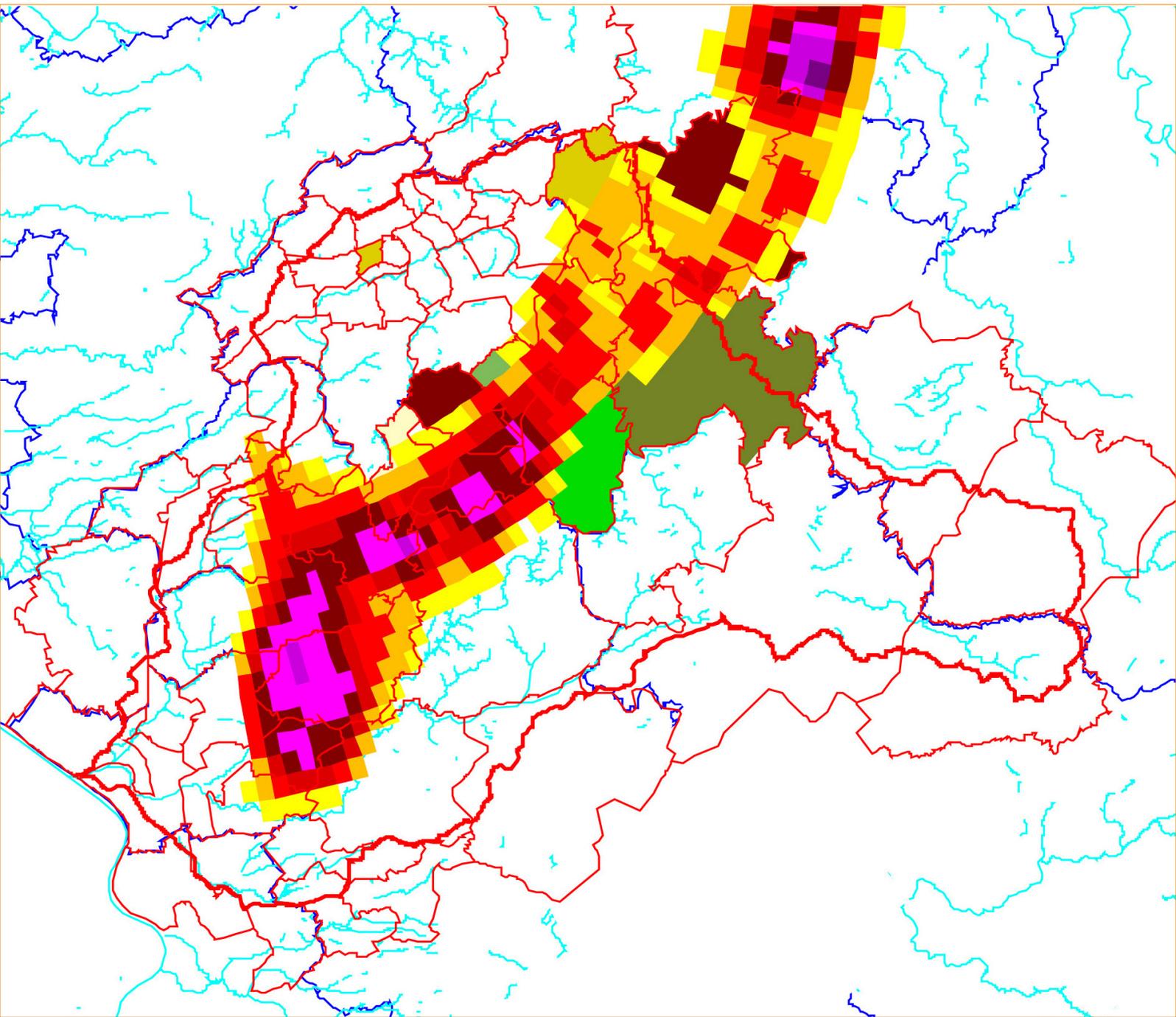


Machbarkeitsstudie „Starkregenrisiko 2050“ Abschlussbericht

Kooperationsprojekt des Gesamtverbandes der Deutschen
Versicherungswirtschaft e.V. (GDV) und des Climate Service Centers (CSC)



Climate Service Center
Fischertwiete 1
D-20095 Hamburg
Telefon: +49-(0)40-226 338 424
Telefax: +49-(0)40-226 338 163
Internet: www.climate-service-center.de



Eine Einrichtung des Helmholtz-Zentrums Geesthacht

Das CSC ist eine Einrichtung des Helmholtz-Zentrums Geesthacht

**Machbarkeitsstudie „Starkregenrisiko 2050“ -
ein Kooperationsprojekt zwischen dem GDV
und dem CSC**

Abschlussbericht

Gliederung

1	Einleitung	3
2	Synthese der Entwicklung extremer Niederschläge in den letzten Jahrzehnten	4
2.1	Allgemeine Niederschlagsentwicklung	4
2.2	Analysen von Starkniederschlägen in Europa	4
2.3	Analysen von Starkniederschlägen in Deutschland	5
2.4	Analysen von Starkniederschlägen für Regionen in Deutschland und angrenzenden Regionen	6
2.5	Ergebnisse	7
2.6	Ergebnisse des ExUS-Projekts in NRW	8
3	Zusammenhang von Starkregen und Schäden – Schadensfunktionen	9
3.1	Datenbasis	9
3.2	Bestandsaufnahme	10
3.3	Ereignisbezogener Ansatz	12
3.3.1	Bayern	13
3.3.2	Nordrhein-Westfalen	17
3.4	Regionalbezogener Ansatz	20
3.5	Fallstudien Wuppertal und Dortmund	22
3.5.1	Ziel und Aufgabenstellung	22
3.5.2	Daten und Methoden	23
3.5.3	Fallstudie Wuppertal	24
3.5.4	Fallstudie Dortmund	27
3.6	Wetterlagenbezogener Ansatz	32
3.6.1	Wetterlagenklassifizierung der Starkregenereignisse	32
3.6.2	Ergebnisse	37
3.6.3	Wetterlagenklassen und Schadenhäufigkeiten	39
4	Starkregenänderungskarte für Deutschland auf Kreisebene	42
4.1	Übereinstimmung	45
4.2	Signifikanz	46
4.3	Sensitivität gegenüber kleinen zeitlichen Verschiebungen	48
4.4	Aggregierte Darstellung	49
5	Lessons Learned der Machbarkeitsstudie	51
6	Literatur	52
7	Glossar	55
	Anhang	58

1 Einleitung

Basierend auf dem Workshop-Report 1 [„Klimafolgenforschung zur Beurteilung der Auswirkungen von konvektiven Extremwetterereignissen auf die Schadenslast in Deutschland“](#) hat das Climate Service Center (CSC) in einer Kooperation mit dem Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (GDV) im Zeitraum Juli 2010 bis März 2012 die Machbarkeitsstudie „Starkregenrisiko 2050“ durchgeführt. Das Projekt soll dem ermittelten Forschungs- und Informationsbedarf des Workshops in einigen ausgewählten Teilen gerecht werden. Ziel dieser Machbarkeitsstudie war, einen Forschungsansatz und die notwendigen Methoden sowie Eingabegrößen für eine bundesweite Ermittlung des Zusammenhangs zwischen Starkregen und Versicherungsschäden an Wohngebäuden abzuschätzen. Die Machbarkeitsstudie besteht aus drei Modulen.

Modul 1 beschäftigt sich mit der zukünftigen Entwicklung von Starkregen in Deutschland. Dazu wird ein Ensemble regionaler Klimaänderungssimulationen auf zukünftige Trends im Starkregen untersucht. Ein Schwerpunkt der Untersuchung liegt in der Identifikation von Regionen, in denen diese Trends robust sind. Für die Analyse in Modul 1 wird unter Starkregen eine tägliche Regensumme von mehr als 25 mm verstanden, die Methode lässt sich aber leicht übertragen auf weitere schadensrelevante Regenintensitäten.

Eine Synthese der Untersuchungen historischer Trends von Starkregen verschiedener Intensitäten wird in Modul 2 geliefert.

Modul 3 der Machbarkeitsstudie beschäftigt sich mit der Frage, ob es möglich ist, eine Schadensfunktion zwischen Regen und Schadensmeldungen aufzustellen. Dabei wird insbesondere untersucht, welche Methoden und Einflussgrößen das Potential haben, diese Beziehung für heutiges Klima zu beschreiben, und ob es möglich ist, aus den vorliegenden Daten Intensitäten zu identifizieren, ab denen Regen Schäden verursacht.

Das Problem einer nicht einheitlichen Definition des Begriffs ‚Starkregen‘ wird an einigen Stellen des Berichts thematisiert.

Dieser Bericht gliedert sich wie folgt:

Der erste Teil des Berichts widmet sich der Untersuchung der historischen Trends von Starkregen bzw. der Entwicklung extremer Niederschläge in den letzten Jahrzehnten. Im zweiten Teil werden die verschiedenen Methoden vorgestellt, mit denen der Zusammenhang von Starkregen und Schäden beschrieben werden kann. Der dritte Teil gibt einen Ausblick auf von Klimamodellen projizierte zukünftige Änderungen im Starkregen. Am Ende des Berichts werden die „lessons learned“ zusammengefasst und Vorschläge zur weiteren Vorgehensweise präsentiert. Fachvokabular der Versicherungswirtschaft sowie meteorologische und statistische Fachbegriffe werden im Glossar erläutert.

2 Synthese der Entwicklung extremer Niederschläge in den letzten Jahrzehnten

Starkregenereignisse sind wegen ihres hohen Schadenspotentials von großer Bedeutung. Das schlägt sich auch in zahlreichen wissenschaftlichen Untersuchungen nieder, in denen Zeitreihen von Beobachtungsdaten (Stationsdaten) analysiert werden. Die Ermittlung von zeitlichen Veränderungen des Niederschlags steht dabei im Vordergrund. In einer kurzen Zusammenfassung werden einige Arbeiten und deren Ergebnisse vorgestellt.

In den folgenden Abschnitten werden Untersuchungen zur Entwicklung des Niederschlags und von extremen Ereignissen in den letzten Jahrzehnten dargestellt. Die Analyse von Extremwerten erfordert zunächst eine Definition eines Starkregen- oder Extremniederschlagsereignisses. Dies wird von den Autoren unterschiedlich vorgenommen. Ferner müssen geeignete statistische Verfahren zur Ermittlung dieser Ereignisse, zur Bestimmung von Trends und zur Signifikanzanalyse sowie ggf. Robustheitsmaße für die Interpretation angegeben werden. Auch hier gibt es unterschiedliche Ansätze, die zum Teil von der Fragestellung abhängen. In den Studien werden ferner unterschiedliche Gewichte auf die Analyse der Häufigkeit von Extremereignissen, die Andauer oder die maximale Niederschlagsmenge gelegt. Den Analysen liegen Tagessummen des Niederschlags zugrunde.

2.1 Allgemeine Niederschlagsentwicklung

Einen Überblick über die generelle Niederschlagsentwicklung in Deutschland gibt der Klimatrendatlas Deutschland 1901 – 2000 (Schönwiese und Janoschitz, 2005). Es werden Niederschlagstrends aus Monatssummen an 131 Stationen bestimmt. Die Daten sind qualitätskontrolliert und homogenisiert.

Der Trend des Gebietsmittels des Niederschlags ist für Jahreswerte positiv (Anstieg von 735 mm auf 800 mm), im Sommer (Juni, Juli, August) wird eine leichte Abnahme (von 250 mm auf 245 mm), im Winter (Dezember, Januar, Februar) eine Zunahme (von 155 mm auf 190 mm) ermittelt. Im Winter verstärkt sich der Trend in den letzten Jahrzehnten des Jahrhunderts von 19 % für 1951 – 2000 auf 34 % für 1971 – 2000. Auch im Herbst wird für alle Zeitintervalle eine Zunahme festgestellt, aber der Trend verschärft sich nicht zum Ende des Jahrhunderts. Frühjahrs- und Sommerniederschläge zeigen eher eine große Variabilität in den verschiedenen Mittelungsintervallen.

Karten der räumlichen Muster der jahreszeitlichen Trends zeigen ein eher uneinheitliches Bild. Der langjährige Trend ist im Südosten Deutschlands zu allen Jahreszeiten positiv, im Winter im Alpenvorland sehr stark positiv. Eine Niederschlagsabnahme zeigt sich im Sommer überall außer in begrenzten Regionen im Norden, Westen und Südosten. Die Abnahme ist am stärksten in Sachsen. Dort und in den anderen östlichen Bundesländern wird auch im Herbst eine Abnahme verzeichnet. Für das Zeitintervall 1971 – 2000 wird das Bild deutlich heterogener. Hervorzuheben sind sehr starke Niederschlagszunahmen von mehr als 50 % an der Ostseeküste im Winter, Niederschlagsabnahmen von mehr als 20 % in begrenzten Regionen in Hessen (Frühjahr und Sommer), Südostbayern (Sommer) und Brandenburg/Sachsen (Herbst).

2.2 Analysen von Starkniederschlägen in Europa

Speziell auf Zyklonen zurückzuführende Extremniederschläge analysieren Karagiannidis et al. (2009). Aus Tageswerten des Niederschlags von 280 europäischen Stationen werden Ereignisse ausgeschlossen, die auf Gewitter zurückzuführen sein können, so werden bspw. die Sommermonate nicht berücksichtigt. Ein Extremniederschlagsfall wird definiert als ein

Ereignis mit mehr als 60 mm Tagesniederschlag. Eine Extremniederschlagsepisode wird definiert als Ereignis, in dem entweder am selben Tag mindestens zwei Station in einem Umkreis von 550 km 60 mm/d überschreiten oder am vorhergehenden und/oder nachfolgenden Tag mindestens eine Station (dieselbe oder benachbarte) mindestens 60 mm/d aufweist. Die Zahl der so definierten Ereignisse nimmt von 1958 bis 2000 je Jahr um - 0.38 leicht ab, was etwa 4 Fällen in einer Dekade entspricht. Die Abnahme der Anzahl der Extremniederschlagsepisoden ist zu Beginn des Untersuchungszeitraums, 1958 bis 1975, größer als am Ende der Zeitraums. Eine saisonale Unterscheidung zeigt den größten Anteil an Fällen und Episoden in den Monaten September bis Dezember mit einem Maximum in Oktober und November (je 18% Anteil an Fällen und 22% Anteil an Episoden). Das Frühjahr weist einen deutlich geringeren Anteil an Fällen und Episoden auf. Da im Frühjahr ein größerer Anteil an Fällen als an Episoden erkennbar ist, kann vermutet werden, dass sich dahinter einige Starkregenereignisse verbergen, die auf Gewitterzellen zurückzuführen sind.

2.3 Analysen von Starkniederschlägen in Deutschland

Eine Trenduntersuchung des Extremniederschlags für Deutschland wurde, basierend auf Daten des Deutschen Wetterdienstes für 11 Stationen von 1901 bis 2000 und für 54 Stationen von 1941 bis 2000 durchgeführt (Grieser und Beck, 2002). Unter einem Starkregenereignis wird hier die Überschreitung des 99% - Quantils der Messzeitreihe einer Niederschlagsstation verstanden. Es werden die folgenden Größen bestimmt: Zunahme der Starkniederschlagstage, -menge, -intensität, Zunahme der Gesamtniederschlagsmenge, und der Starkniederschlagsanteil. Die Autoren stellen fest, dass sowohl die Starkniederschlagsmenge als auch die -intensität in den Zeitintervallen zunimmt, und zwar stärker als die des Niederschlags insgesamt. Es handelt sich um eine signifikante Häufung der Trends, insbesondere in den letzten 40 Jahren. Eine Korrelation der Trendwerte mit der Stationshöhe zeigt keine Signifikanz, wobei allerdings Luv- und Leelagen nicht explizit untersucht wurden.

Für das Zeitintervall 1950 – 2004 analysieren Zolina et al. (2008) 2000 in Westdeutschland (ehemalige BRD) liegende Niederschlagsstationen bezüglich linearer jahreszeitlicher Trends in Extrem- und Starkniederschlägen. Unter Starkniederschlag werden Überschreitungen des 95 % - Quantils, unter Extremniederschlag Überschreitung des 99 % - Quantils verstanden, abgeleitet aus der zugrundeliegenden Gammaverteilung. Im Winter werden die höchsten Starkregenwerte (> 35 mm/d) in den Bergregionen Süddeutschlands ermittelt, lokal auch im Bergland in der Mitte Deutschlands (> 20-25 mm/d), wobei im Flachland die geringsten Werte (< 10 mm/d) ermittelt werden. Das Muster ist im Sommer ähnlich, die Quantile liegen aber im Bereich von 10 – 45 mm/d. Fast alle Stationen (1800) weisen im Winter positive Trends des 95 % - Quantils auf, 666 davon signifikant. Nur 17 Stationen, eher verstreut im Süden und Südosten zeigen negative signifikante Trends. Die höchsten Zunahmen von mehr als 11 % pro Dekade treten im zentralen Westen und im südöstlichen Bergland auf. Im Frühjahr ist die Anzahl der Stationen mit signifikant positivem Trend geringer und auch die Trends sind geringer als im Winter. Im Bergland im Süden Westdeutschlands treten große Trends auf, außer im Alpenraum, wo Abnahmen zu verzeichnen sind. Im Sommer werden überwiegend signifikante Abnahmen des Starkniederschlags ermittelt, nur in einem Cluster von Stationen am Alpenrand nimmt das 95 % - Quantil um 2 bis 4 % pro Dekade zu. Der Herbst zeigt meist positive Trends, jedoch an weniger Stationen als im Winter, aber mit ähnlich hohen Zunahmen von 8 – 10 % pro Dekade. Ein Cluster in Nordbayern zeigt dagegen starke Abnahmen. Räumliche Muster der Trends sind nicht klar erkennbar. Durch die Entwicklung der jahreszeitlichen Trends in den letzten Jahrzehnten haben sich Winter- und Sommerextreme aneinander angeglichen, was auf veränderte Wetterlagenklassen zurückzuführen ist.

2.4 Analysen von Starkniederschlägen für Regionen in Deutschland und angrenzenden Regionen

Frei und Schär (2001) werten Tageswerte von 113 Niederschlagsstationen in der Schweiz für den Zeitraum 1901 bis 1994 aus. Sie ermitteln für jede Station die Daten, die die oberen Quantile 1/10, 1/30, 1/100 und 1/365 überschreiten und somit einer Wiederkehrperiode von 10, 30, 100 und 365 Tagen entsprechen. Diese Ereignisse werden als ‚moderat‘, ‚intensiv‘, ‚stark‘ und ‚extrem‘ beschrieben. Eine signifikante Zunahme des intensiven Niederschlags wird nur für Herbst und Winter ermittelt mit signifikanten Ergebnissen vor allem im nördlichen Flachland der Schweiz (Grenze zu Deutschland). Extreme Ereignisse mit einer Wiederkehrperiode größer gleich 1 Jahr zeigen seltener einen signifikanten jahreszeitlichen Trend als intensive Ereignisse. Es werden aber zu allen Jahreszeiten Stationen mit signifikant positiven Trends registriert, ebenfalls eher im nördlichen Flachland.

Die Studie von Hundecha und Bardossy (2005) basiert auf 611 Niederschlagsstationen im deutschen Bereich des Rheineinzugsgebiets im Zeitintervall 1958 – 2001. Für verschiedene Niederschlagsindices werden Trends ermittelt und auf Signifikanz geprüft. An sehr vielen Stationen werden signifikante Zunahmen der Indices für Herbst, Winter und Frühjahr ermittelt. So nimmt bspw. das 90 % - Quantil des Winterniederschlags um 20.7 % zu, während im Sommer dieser Index um 6.4 % abnimmt, die Änderung also nicht sehr groß ist. Aus hydrologischer Sicht, etwa was Überflutungen angeht, ist der akkumulierte Niederschlag (Index: höchste Niederschlagssumme über 5 Tage) wichtiger. Dieser Index nimmt im Winter um 37.5 % zu, und auch die Anzahl der Stationen mit signifikantem Trend nimmt zu. Im Sommer dagegen nimmt dieser Index im Mittel um 11 % ab. Die Häufigkeit extremer Niederschläge wird analysiert durch den Anteil von Starkniederschlag (Niederschlag von Ereignissen mit mehr als 90 % - Quantil) am Gesamtjahresniederschlag sowie die Anzahl der Starkniederschläge größer als das 90 % - Quantil. Bei beiden Indices gibt es eine große Zunahme im Winter (> 47 % bzw. 56 %) und im Sommer eine etwas schwächere Abnahme (-9 % bzw. -21 %). Diese Änderungen sind im Winter an vielen Stationen signifikant, im Sommer eher an wenigen Stationen. Stationen mit signifikanten Änderungen liegen überwiegend im Bergland des Rheineinzugsgebietes.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass im Untersuchungsgebiet eine Zunahme extremer Niederschläge (in Menge und Andauer) im Winter und teilweise in den Übergangsjahreszeiten zu verzeichnen ist, im Sommer dagegen wird eine Abnahme extremer Niederschläge ermittelt.

Lupikasza et al. (2011) untersuchen Tagesniederschlagsdaten von 43 Stationen in Mittel- und Ostdeutschland sowie Südpolen für 1951-2006. Sie verwenden acht Indizes für Intensität und Häufigkeit. Es werden für jede Station gleitende Trends über 30 Jahre ermittelt und jeder Trend einem Signifikanztest (mit einem niedrigen Signifikanzniveau von 80%) unterzogen. Für jede Station und jeden Index werden dann Prozentzahlen der signifikanten Trends im Gesamtkollektiv bestimmt und je nach Häufigkeit (15, 25, 50, 75 %) mit 'unstable', 'poor', 'stable', 'strongly stable' und 'very strongly stable' bezeichnet ('trend stability analysis'). In den meisten Fällen sind schwache Trends instabil. Im deutschen Teil des Untersuchungsgebiets dominieren positive Trends. Im Winter sind diese Trends ausgeprägt und stabil. Im Sommer werden stabile positive Trends nur in Polen festgestellt. In Deutschland werden auch negative Trends festgestellt, aber nur für weniger als die Hälfte der Stationen. Das deutet auf eine höhere zeitliche Variabilität der Niederschläge hin. Die Übergangsjahreszeiten zeigen für alle Indices oft ein – zeitlich und räumlich – uneinheitliches Bild. Stabile zunehmende Extremniederschläge treten im Frühjahr im südlichen Teil des deutschen Untersuchungsgebiets auf, stabile große Abnahmen werden im zentralen Untersuchungsgebiet ermittelt. Die Ursache für die einerseits gleichartigen, andererseits gegensätzlichen Ergebnisse in den Trends kann die großräumige Zirkulation – saisonal ausgeprägt durch maritime oder kontinentale Unterschiede – sein, die durch lokale orographische Parameter modifiziert wird.

Für Zentraleuropa analysieren Kürbis et al. (2009) Extremniederschläge sehr langer Messreihen der Stationen Potsdam (1893-2005) und Prag (1775-2004). Ausgewertet wird ein diagnostischer Index, ein Überschreitungsprodukt aus Intensität und Häufigkeit von Extremen. Für dieses Produkt werden Trends ermittelt. Dies wird für Sommer und Winter durchgeführt. Als Ergebnis werden Zeitreihen der Indexwerte mit Konfidenzbereichen dargestellt. Der ermittelte Trend ist für keine der Jahreszeiten signifikant. Möglicherweise ist aber eine einzelne Station für eine Trendermittlung nicht aussagekräftig genug.

2.5 Ergebnisse

Die Tabelle 1 fasst die Ergebnisse zusammen. Die Analyse von Starkregenereignissen in Deutschland in verschiedenen Studien zeigt die unterschiedliche Vorgehensweise. Die Definition von Stark- und Extremereignissen des Niederschlags ist nicht einheitlich und auch die weitere statistische Auswertung unterscheidet sich je nach Zielsetzung, aber auch je nach Datenbasis. Viele Autoren betrachten die Niederschlagsstationen nicht isoliert sondern in ihrem flächenhaften Zusammenhang, um so zu robusteren Aussagen zu kommen. Die Aussagekraft einer einzelnen Station kann durch lokale Gegebenheiten sehr begrenzt sein. Insgesamt wird festgestellt, dass alle Indices von Stark- oder Extremniederschlägen in den letzten Jahrzehnten im Winter zugenommen haben, teilweise mit sehr großen Änderungen. Die Auswertung der Sommertrends fällt uneinheitlich aus und weist regionale Unterschiede aus.

Tabelle 1. Trendanalyse von Starkregenereignissen der letzten Jahrzehnte

Region Autoren	Datensatz	Zeitraum	Definition Indices Ergebnis
Europa Karagiannidis et al. (2009)	280 Stationen Tageswerte ohne Sommermonate	1958- 2000	Ereignis: > 60 mm Episode: mehr als 2 Stationen mehr als 2 d Analyse: insgesamt Abnahme um 4 Ereignisse / Dekade 1958-1975: Abnahme um 80 Ereign./ Dek.
Deutschland Grieser u. Beck, 2002	11 Stationen 54 Stationen	1901- 2000 1941- 2000	Extremniederschlag > 99 % - Quantil (Tage, Menge, Intensität) signifikante Häufung der positiven Trends von Menge und Intensität
Deutschland (ehem. BRD) Zolina et al., 2008	2000 Stationen	1950- 2004	95 % Quantil positive lineare Trends in Winter (>50% der Stat. signifikant), Frühjahr und Herbst im gesamten Gebiet, Zunahme 10 % /10 y im Süden u. Mitte negative Trends im Sommer in Mitte und Südwesten, teils > 8 % / 10 y einzelne Cluster mit abweichenden Trends
SW- Deutschland (Schweiz) Frei u. Schär, 2001	113 Stationen	1901- 1994	Wiederkehrperioden 10/30/100/365 Tage (,moderat', ,intensiv', ,stark', ,extrem') signifikant Zunahme des intensiven Niederschlags im Herbst u. Winter, bei extremem Niederschlag alle Jahreszeiten, aber nur wenige Stationen
Rheinbecken Hundecha u. Bardossy, 2005	61 Stationen	1958- 2001	Starkregen: 90 % - Quantil Winter Zunahme 20 %, Sommer Abnahme 6 % 5-d-Niederschlagssumme Winter Zunahme 38 %, Sommer Abnahme 11 %

			Anteil Menge Starkregen / Gesamtniederschlag Winter Zunahme 47 %, Sommer Abnahme 9 % Anzahl Starkregentage Winter Zunahme 56 %, Sommer Abnahme 21 %
Potsdam Kürbis et al. (2009)	Tageswerte der Station Potsdam	1893- 2005	Gekoppelter Index Intensität und Häufigkeit kein signifikanter Trend
Mittel- und Ostdeutschland Lupikasza et al., 2011	18 Stationen	1951- 2008	8 Indices für Intensität u. Häufigkeit basierend auf 90 % u. 95 % - Perzentil. Prozentuale Änderungen signifikant. Trends im Gesamtkollektiv ausgewertet. Winter für fast alle Indices stabile positive Trends. Sommer < 50 % der Stationen signifikante negative Trends. Stabile zunehmende Extremniederschlagstrends eher im Süden, stabile abnehmende Extremniederschlagstrends eher im Zentrum des Untersuchungsgebiets

2.6 Ergebnisse des ExUS-Projekts in NRW

Die ExUS-Studie (LANUV, 2010) wurde für Nordrhein-Westfalen (NRW) vom Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) durchgeführt. Daneben existieren weitere Projekte in denen die Niederschlagsentwicklung in einzelnen Regionen von Deutschland bzw. in Anrainerstaaten untersucht wurde. Auszugsweise sind Projekte wie KLIWA (Arbeitskreis KLIWA, 2006), KLIF (Forschungsverbund KLIF 2011) oder KLIWAS (BMVBS, 2009) zu nennen. Bei einer Fortführung des Projektes bzw. einer deutschlandweiten Betrachtung sollten diese Studien genauso detailreich analysiert werden wie die ExUS Studie. Bei dieser Studie wurde mit der größtmöglichen verfügbaren Datenbasis in NRW zwischen 1950 und 2008 gearbeitet. Die Daten wurden qualitätsgeprüft und die Reihen mit einer Länge von mindestens 20 Jahren selektiert. Danach verblieben Niederschlagsdaten von 176 kontinuierlich messenden Stationen und von 412 Tageswertstationen.

Aus der Untersuchung lassen sich für NRW als Schlussfolgerungen ziehen:

- Die natürlichen **Klimaschwankungen sind deutlich in den Zeitreihen** erkennbar und wirken sich direkt auf den Parameter Niederschlag und auf alle untersuchten Bilanzierungszeiträume – von 5-Minuten-Summen bis hin zu Jahressummen – aus. Die Trendanalysen über Zeitfenster von 30 Jahren haben gezeigt, dass diese zu gegenläufigen Trendaussagen führen können und nicht repräsentativ für langfristige Klima- und Niederschlagsänderungen sind. Einen besonderen Einfluss auf die Trendanalysen relativ kurzer Zeitfenster über 30 Jahre nimmt die trockene Dekade 1971-1980, die in der Mitte des Gesamtzeitraums 1950-2008 liegt. Für Trendaussagen, die auch eine nur begrenzte Extrapolation in die Zukunft zulassen, sind daher Zeitreihenlängen von mindestens 50 Jahren zu untersuchen.
- An den Stationen mit langen Zeitreihen sind flächendeckend für NRW Veränderungen des Niederschlagregimes, teilweise auf einem signifikanten Niveau, festzustellen. Diese Veränderungen gingen aber weitgehend unbemerkt vonstatten und zogen keine Probleme in wasserwirtschaftlichen Anwendungen nach sich. Ausnahmen sind die niedrigen Wasserstände für die Trinkwasserversorgung in den 70er Jahren oder der extrem heiße und trockene Sommer 2003. Allerdings sind in den letzten 10 Jahren vermehrt **Starkregeneignisse** aufgetreten, die in den Städten zu Überflutungen geführt haben. Diese Häufung besonders starker Ereignisse hat es aber bereits auch schon in den 1950er- und in der zweiten Hälfte

der 1960er-Jahre gegeben. Es wird zu prüfen sein, ob in Zukunft die Häufigkeit und Intensität der Starkregen wieder abnimmt, auf einem hohen Niveau verbleibt oder sogar weiter zunimmt.

- Bei der Zunahme der Anzahl von Extremereignissen bei den Messungen kurzer Dauerstufen (<1 Stunde), die für die Siedlungsentwässerung eine große Rolle spielen, **überlagern sich der Messeffekt und der Klimateffekt**. Beide Effekte spielen eine Rolle, die besonders starken Zunahmen bei Dauerstufen über 5 und 15 Minuten sind aber mehr auf die Modernisierung der Messgeräte als auf einen Klimateffekt zurückzuführen.

Anders als bei den langen Bilanzierungsdauern, für die Tagesmesswerte ausreichend sind, liegen lange Zeitreihen mit kontinuierlichen Messdaten nicht flächendeckend für NRW vor.

Fazit der Analyse historischer Trends von Starkregen

Es wird übereinstimmend unabhängig vom Analyseverfahren für den Winter eine signifikante und robuste Zunahme von Starkregen und extremen Niederschlägen in den letzten Jahrzehnten festgestellt. Die Aussagen für den Sommer sind uneinheitlich und zeigen meist eine Abnahme der Niederschlagsintensität und -häufigkeit mit geringer Signifikanz. Hier treten regionale Unterschiede auf. Insgesamt ist die dekadische Variabilität sehr groß und dominiert noch in 30-jährigen Analysezeiträumen.

Robustheit wurde nicht untersucht, allenfalls kann man von einer räumlichen Robustheit ausgehen.

3 Zusammenhang von Starkregen und Schäden – Schadensfunktionen

In diesem Abschnitt werden vier verschiedene methodische Ansätze präsentiert um den Zusammenhang von Starkregen und Schäden zu analysieren. Im ereignisbezogenen Ansatz werden Analysen auf Kreisebene sowie auf Postleitzahlenebene miteinander verglichen.

Die Auswirkung von naturräumlichen Abgrenzungen in Bayern ist der Bestandteil der Untersuchungen des regionalbezogenen Ansatzes. In den Fallstudien kommen Radardaten zum Einsatz um den Zusammenhang von Starkregen und Schäden zu quantifizieren. Den Abschluss bildet der wetterlagenbezogene Ansatz. Ziel dieser Methode ist zu untersuchen ob das gehäufte Auftreten von Schäden an spezifische Wetterlagen gekoppelt ist.

3.1 Datenbasis

Für die Ermittlung der Schadensfunktionen werden meteorologische Datensätze (beobachtete Niederschlagsmengen) und Schadensdatensätze (Elementarschäden an Gebäuden) zusammengeführt.

Die Daten wurden durch den GDV zur Verfügung gestellt, beinhalten Informationen zu Schadenanzahl, Schadenaufwand (Euro), der Anzahl der Verträge sowie die Versicherungssumme (Tsd. Euro) im Kreis bzw. in Postleitzahlregionen und umfassen den Zeitraum von 2002 bis 2008. Bei der Schadenskatalogisierung erfolgte eine Unterteilung in Wasserschaden (W) und unbekannter Schaden (U). Schäden mit anderen benannten Ursachen wie Erdbeben und Schneedruck sind nicht Teil der Analyse. In der Schadenkatalogisierung ist nicht erkennbar, ob es sich um Starkregenschäden im engeren Sinne handelt oder ob Ausuferung größerer Flüsse oder Rückstau ursächlich war. Zusätzlich wurden 26 Starkregenereigniszeiträume von unterschiedlicher Länge durch den GDV definiert (siehe Tabelle 1a im Anhang). Für die Ereignisse 1 bis 4 sind keine Schadensdaten dokumentiert, da erst ab dem Jahr 2002 durch die Versicherungen kontinuierlich Schadensstatistiken mit ausreichenden Beständen geführt wurden. Die Zusammenfassung mehrerer Tage zu einem

Ereignis ist rein versicherungstechnisch begründet. Für Fragen des Zusammenhangs von meteorologischen Parametern und Schäden liegen die Daten taggenau vor.

Ursprünglich wurde eine deutschlandweite Betrachtung angestrebt. Weil es nicht möglich war, Niederschlagsbeobachtungsdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) zu beziehen, musste das Ziel auf zwei Testgebiete, die Bundesländer Bayern und Nordrhein-Westfalen (NRW), korrigiert werden. Für diese Gebiete konnten Niederschlagsstationsdaten des Bayerischen Landesamtes sowie Daten der ExUS Studie (Extremwertstatistische Untersuchung von Starkniederschlägen in NRW) in NRW beschafft werden (LANUV, 2010).

Als Alternative wurde geprüft, ob die frei verfügbaren Daten der WMO-Niederschlagsstationen genutzt werden können. Da diese sich als relativ lückenhaft und zum Teil fehlerbehaftet herausstellten, wurden sie nur als Ergänzung der Datenbasis in Bayern und NRW genutzt, konnten aber nicht die Datenlücken in den übrigen Bundesländern füllen.

Für das Bundesland Bayern liegen für den Zeitraum von 2004 bis 2009 Niederschlagstagesummen von durchschnittlich 100 Messstationen des Bayerischen Landesamtes sowie Niederschlagstagesummen von 55 WMO-Stationen vor. Bei einer Fläche von 70.551,57 km² entspricht dies einer mittleren Stationsdichte von 1/455 km². Bei beiden Datensätzen (Bayerisches Landesamt, WMO) handelt es sich um kontinuierliche Zeitreihen.

In Nordrhein-Westfalen bilden Niederschlagsstationen verschiedener Betreiber und zeitlicher Messverfahren die Datengrundlage. Die Datenbasis ist die Grundlage der ExUS Studie und besteht aus zwei Messnetzen. In einem, vom DWD betriebenen, Messnetz wird der Niederschlag als Tagessumme registriert. Während für das Jahr 2002 255 Stationen zur Verfügung stehen, waren es für die ExUS - Studie für das Jahr 2008 lediglich 36 Stationen. Durchschnittlich stehen über den Zeitraum 2002 bis 2008 191 Niederschlagsstationen zur Verfügung, die Stationsdichte liegt bei 1/178km².

Das zweite Stationsnetz in NRW registriert den Niederschlag in Minutenwerten und wird vom Land NRW, Wasserverbänden und Kommunen betrieben. Für das Projekt ExUS war eine Mindestbeobachtungsdauer von 20 Jahren festgelegt. Es liegen durchschnittlich 158 Messstationen vor, wobei die Stationsanzahl von 2002 bis 2008 kleiner wird, da nur Reihen mit einer Mindestbeobachtungsdauer von 20 Jahren betrachtet wurden (2002: 155; 2008: 81). Die Stationsdichte dieses Messnetzes beträgt rund 1/215 km². Für die ExUS - Studie wurden die Niederschlagswerte nicht in kontinuierlichen Messzeitreihen sondern in Form von partiellen Serien ausgewertet. Die Datenbasis für das Projekt ExUS unterscheidet sich daher nicht nur zeitlich (Minutenwerte) und räumlich (Stationsdichte) sondern auch strukturell (partielle Serie) von der für Bayern.

3.2 Bestandsaufnahme

Als erstes wurde eine Bestandsaufnahme sowohl der Niederschlagsdaten als auch der Schadensdaten durchgeführt. Abbildung 1 zeigt exemplarisch für das Jahr 2005 (1a) und das Jahr 2007 (1b) die Niederschlagsereignisse sowie die Schadenhäufigkeiten aller Kreise in Bayern in zeitlicher Abfolge.

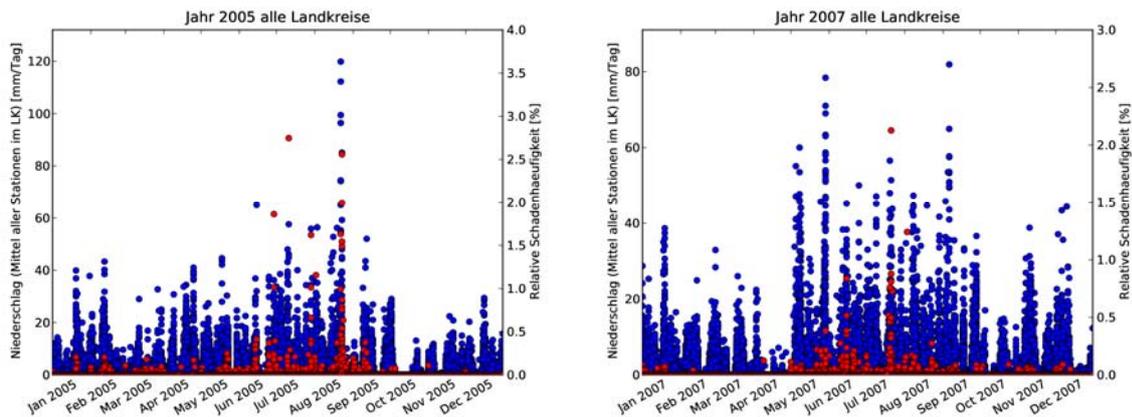


Abbildung 1. Blau: Tagesniederschläge [mm/Tag] (im Falle mehrerer Stationen im Kreis wurde der Mittelwert berechnet) und rot: Schadenhäufigkeiten [%] für das Jahr 2005 (a) und das Jahr 2007 (b)

Aus Abbildung 1 wird deutlich, dass für bestimmte Ereignisse klare Zusammenhänge zwischen Niederschlag und Schadenhäufigkeit bestehen (z.B. August 2005, Juli 2007). Ebenfalls deutlich wird aber, dass ähnlich starke Niederschlagsereignisse, jedoch mit nur geringen Schadenhäufigkeiten auftreten (z.B. Mai 2007, Juni 2007). Da aus Abbildung 1 nicht hervorgeht, welche Schadenhäufigkeit zu welchem Niederschlagswert gehört, ist exemplarisch für den einzigen Kreis (Kreis Erlangen - Höchststadt), der im Jahr 2007 eine Schadenhäufigkeit von mehr als 2% zu verzeichnen hatte, eine Zeitreihe der mittleren Tagesniederschläge mit eingezeichneten Schadensmeldungen in Abbildung 2 dargestellt.

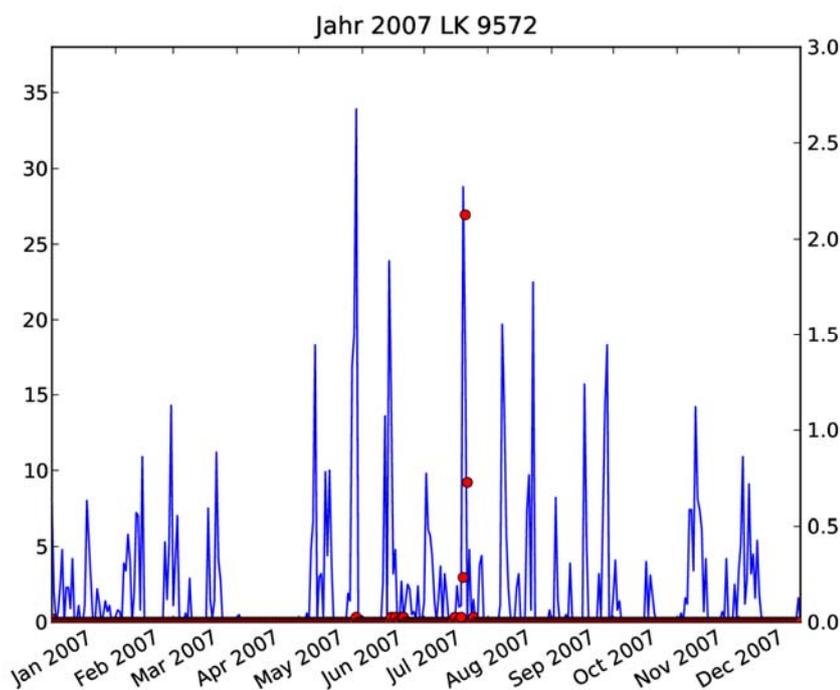


Abbildung 2. Tagesniederschläge [mm/Tag] (blau) und Schadenhäufigkeiten [%] (rot) für das Jahr 2007 und den Kreis Erlangen - Höchststadt.

Abbildung 2 verdeutlicht zweierlei:

1. Die höchste in Abbildung 1b vorkommende Schadenhäufigkeit von über 2% tritt nicht in dem Kreis mit dem höchsten vorkommenden Tagesniederschlag auf. Der zur Schadenhäufigkeit gehörende Tagesniederschlag liegt bei ca. 30mm.
2. Auch für einen einzelnen Kreis gilt: es gibt Starkniederschlagsereignisse mit großen Schadenhäufigkeiten (Juli 2007), und ebenso starke Niederschlagsereignisse mit geringen Schadenhäufigkeiten (Mai/Juni 2007).

Fazit der Bestandsaufnahme

Eine einfache, direkte Ableitung einer Schadenhäufigkeit aus den täglichen Niederschlagsdaten ist nicht möglich.

Folgende Gründe spielen dabei eine Rolle:

- **Nicht jedes starke Niederschlagsereignis, welches an den Stationen in einem Kreis registriert wurde, ist automatisch mit einem gemeldeten Schadensereignis verknüpft. Ebenso kann ein Schaden auftreten, obwohl die Niederschlagsstation nur geringe oder keine Niederschläge gemessen hat. Grund hierfür ist die ungenügende, bzw. bei nur kreisbezogenen Schadensmeldungen unbekannte räumliche Übereinstimmung von Niederschlagsmessstation und Ort des Schadens.**
- **Aus täglichen Niederschlagssummen lässt sich nicht ableiten, ob ein Niederschlagsereignis wirklich ein schadensträchtiges Ereignis war. So kann z.B. 25mm Tagesniederschlag zu großen Schäden führen, wenn dieser binnen einer Stunde fällt. Dies lässt sich in Tagesniederschlagsdaten nicht ohne zusätzliche Informationen trennen.**
- **Ereignisse können so kurz aufeinander folgen, dass die Daten der übermittelten Schäden nicht eindeutig einem der Ereignisse zugeordnet werden können.**

Es wurde daher mit verschiedenen Ansätzen versucht, durch Kategorisierung und Filterung Informationen aus den Daten zu generieren.

3.3 Ereignisbezogener Ansatz

Bei dem ereignisbezogenen Ansatz werden Starkregenereignisse bzw. einzelne Zeiträume betrachtet. Für den ereignisbezogenen Ansatz wurden 22 durch den GDV definierte Schadenszeiträume im Detail analysiert. Die Arbeit gliedert sich in drei Schritte: Datenaufbereitung, räumlichen Zuordnung mit Hilfe von Geographischen Informationssystemen (GIS), statistische Analyse und Schadensfunktionsableitung. Auf Grund der unterschiedlichen Datenbasis erfolgt die Betrachtung für die Bundesländer Bayern und Nordrhein-Westfalen (NRW) getrennt.

3.3.1 Bayern

In diesem Abschnitt werden das methodische Vorgehen für die Analyse des Zusammenhangs von Starkregen und Versicherungsschäden sowie die Analyseergebnisse im Bundesland Bayern dargestellt.

Datenaufbereitung

Bei der Datenaufbereitung wurden alle vorhandenen Schäden (Wasserschäden und Schäden mit ‚unbekannter‘ Ursache) berücksichtigt. Für jeden der 22 durch den GDV identifizierten Starkregenzeiträume wurden der tägliche Schadenaufwand sowie die Anzahl der Schäden ermittelt. Um Schäden zu berücksichtigen, welche eventuell später gemeldet wurden, sind die Ereigniszeiträume um vier Tage erweitert worden. Im nächsten Schritt wurden die Anzahl der Schäden sowie der Schadenaufwand pro GDV-Starkregenereignis für jeden Kreis aufsummiert. Neben diesen Informationen sind für jeden Kreis auch die Anzahl der vorhandenen Verträge sowie die Versicherungssumme bekannt. Das gleiche Vorgehen erfolgte bei der Betrachtung von Postleitzahlregionen, so dass der Schadenaufwand, die Schadenanzahl, die Anzahl der Verträge sowie die Versicherungssumme für einzelne Postleitzahlregionen am Ende der Datenaufbereitung vorlagen.

Als letzter Schritt wurden die Schadenhäufigkeit (Verhältnis von Schadenanzahl zu Anzahl der Verträge in %) und der Schadensatz (Verhältnis von Schadenaufwand zu Versicherungssumme in ‰) pro Kreis/Postleitzahlregion gebildet.

Entsprechend den Ereigniszeiträumen wurden die täglichen Niederschlagssummen der Stationen in Bayern identifiziert. Abschließend wurden die Maximalwerte der Tagessummen der Niederschlagswerte pro Station identifiziert.

Für den nächsten Arbeitsschritt, die räumliche Zuordnung, wurden ausschließlich Kreise berücksichtigt, in denen innerhalb des Ereigniszeitraums auch Schäden aufgetreten sind. Niederschlagsstationen, die keinen Niederschlag registriert haben (< 1 mm Niederschlag), sind für die folgenden Analyseschritte nicht berücksichtigt wurden.

Räumliche Zuordnung

Ziel der räumlichen Zuordnung war es am Ende des Arbeitsschrittes ein Wertepaar zu besitzen, welches aus einem Kreis/Postleitzahlengebiet mit Schaden und einer Niederschlagsstation mit einer Niederschlagsmenge > 0 mm besteht. Die Niederschlagsstationen wurden mit den Kreisen/Postleitzahlengebieten verschnitten, so dass jede Station einem Kreis/Postleitzahlengebiet zugeordnet werden konnte. Wenn in einem Kreis/Postleitzahlengebiet keine Niederschlagsstation vorhanden war, wurde die Niederschlagsstation in kürzester Distanz zur Kreis-/Postleitzahlengbietsgrenze dem Kreis/Postleitzahlengebiet zugeordnet. Existierten mehrere Niederschlagsstationen innerhalb eines Kreises/Postleitzahlengbietes, so wurde die Niederschlagsstation mit dem höchsten Niederschlagswert im Betrachtungszeitraum als repräsentativ für den Kreis/das Postleitzahlengebiet angesehen.

In Bayern ist die Betrachtung auf Postleitzahlenebene nur für einzelne Kreise während einzelner Ereignisse erfolgt. Dabei wurden zwei methodische Konzepte angewendet. Die erste Methode berücksichtigt ausschließlich Postleitzahlengebiete, in denen eine Niederschlagsstation vorhanden ist. Um die Anzahl an Wertepaaren (Schaden/Niederschlag) zu erweitern, sind bei der zweiten Methode alle Postleitzahlengebiete, die einen Radius von 5 Kilometer um einer Niederschlagsstation schneiden, berücksichtigt worden. Dadurch ist eine Niederschlagsstation nicht nur für das Postleitzahlengebiet, in dem sie sich befindet repräsentativ (Methode 1) sondern auch für mehrere angrenzende Postleitzahlengebiete (Methode 2).

Als Ergebnis der Analyse liegt für jedes Starkregenereignis eine Karte mit den betroffenen Kreisen/Postleitzahlengebieten und Niederschlagsstationen (> 0 mm) vor. Abbildung 3 zeigt die durch die GIS Analyse entstandene Karte des Ereignisses 13 vom 17. bis 27.8.2005 in Bayern.

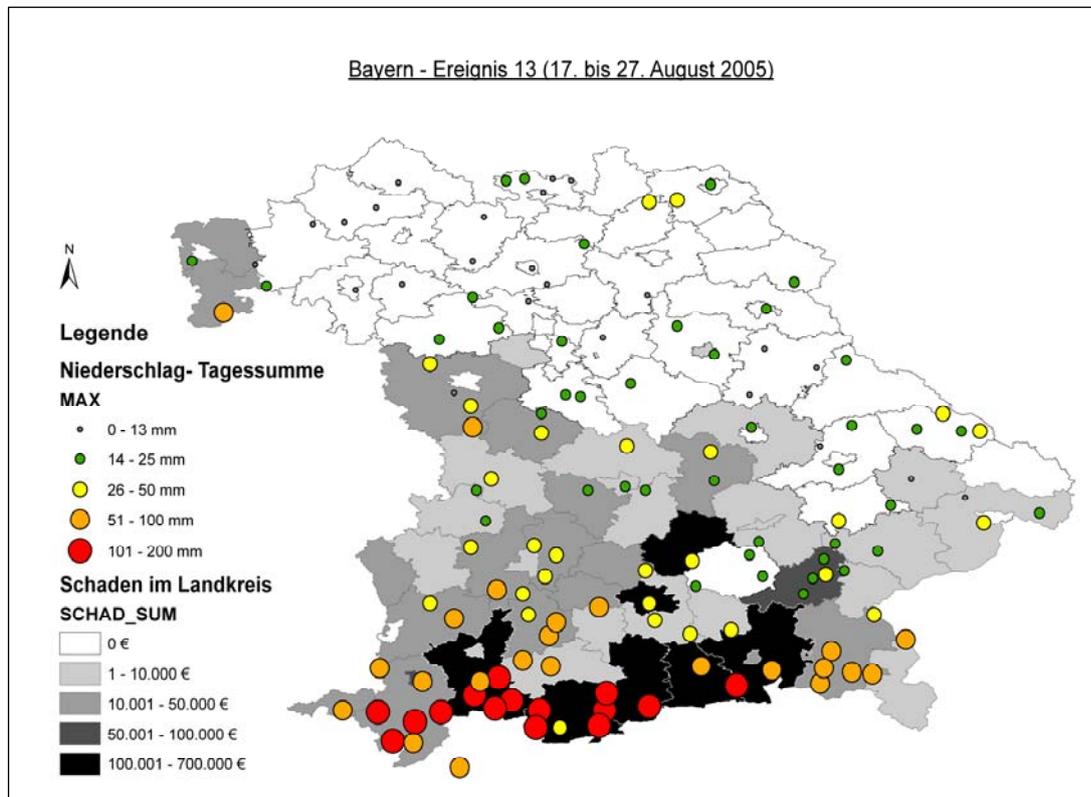


Abbildung 3. Tagessummen der Niederschlagsstationen (Punkte) und Schadenaufwände in den Kreisen von Bayern.

Statistische Analyse

Nach der räumlichen Zuordnung (Bildung von Wertepaaren) erfolgten Berechnungen der Korrelation des maximalen Niederschlags mit dem Schadenaufwand, dem Schadensatz und der Schadenhäufigkeit. Es wurden der Pearson-Produkt-Moment Korrelationskoeffizient und der Spearman-Rangkorrelationskoeffizient berechnet. Der Spearman-Rangkorrelationskoeffizient ist robuster gegenüber Ausreißern als der Korrelationskoeffizient nach Pearson. Die Voraussetzung für den Pearson-Produkt-Moment Korrelationskoeffizient ist ein linearer Zusammenhang. Die statistischen Analysen haben gezeigt, dass die Datensätze häufig von Ausreißern geprägt sind und dass nicht von einem eindeutig linearen Zusammenhang zwischen den Variablen Niederschlag und Schaden ausgegangen werden kann. Deshalb ist der Spearman-Rangkorrelationskoeffizient in den folgenden Kapiteln angegeben und bildet die Grundlage der statistischen Auswertung der Ergebnisse.

Für die statistische Analyse werden zwei Betrachtungsweisen berücksichtigt. Die erste Betrachtungsweise erfolgt ereignisbezogen, d. h. die statistische Analyse der Wertepaare Niederschlag und Schaden erfolgt für jedes einzelne Ereignis. Ein Wertepaar besteht aus einem Kreis bzw. Postleitzahlengebiet und einer Niederschlagsstation. Bei dieser Betrachtungsweise können nicht mehr Wertepaare auftreten als Kreise bzw. Postleitzahlengebiete im Bundesland vorhanden sind. In der Regel ist die Anzahl der Wertepaare zweistellig.

Die zweite Betrachtungsweise erfolgt ereignisunabhängig und wird als Gesamtbetrachtung bezeichnet. Bei der Gesamtbetrachtung aller Ereignisse werden die Wertepaare aller

Ereignisse zusammengefasst und den statistischen Analysen unterzogen. Die Anzahl der Wertepaare ist in der Regel dreistellig.

Entsprechend der einzelnen Datensätze (Kreis, Postleitzahlen) gibt es tabellarische Übersichten über die Korrelationsergebnisse der einzelnen Ereignisse (siehe Anhang Tabelle 2). Im nächsten Schritt wurde der Zusammenhang beider Variablen (Schaden/Niederschlag) versucht mathematisch durch lineare, quadratische, logarithmische und exponentielle Gleichungen zu beschreiben. Die Abbildung 4 zeigt beispielhaft eine lineare (a), eine quadratische (b), eine logarithmische (c) und eine exponentielle (d) Ausgleichskurve für das Ereignis 13 in Bayern.

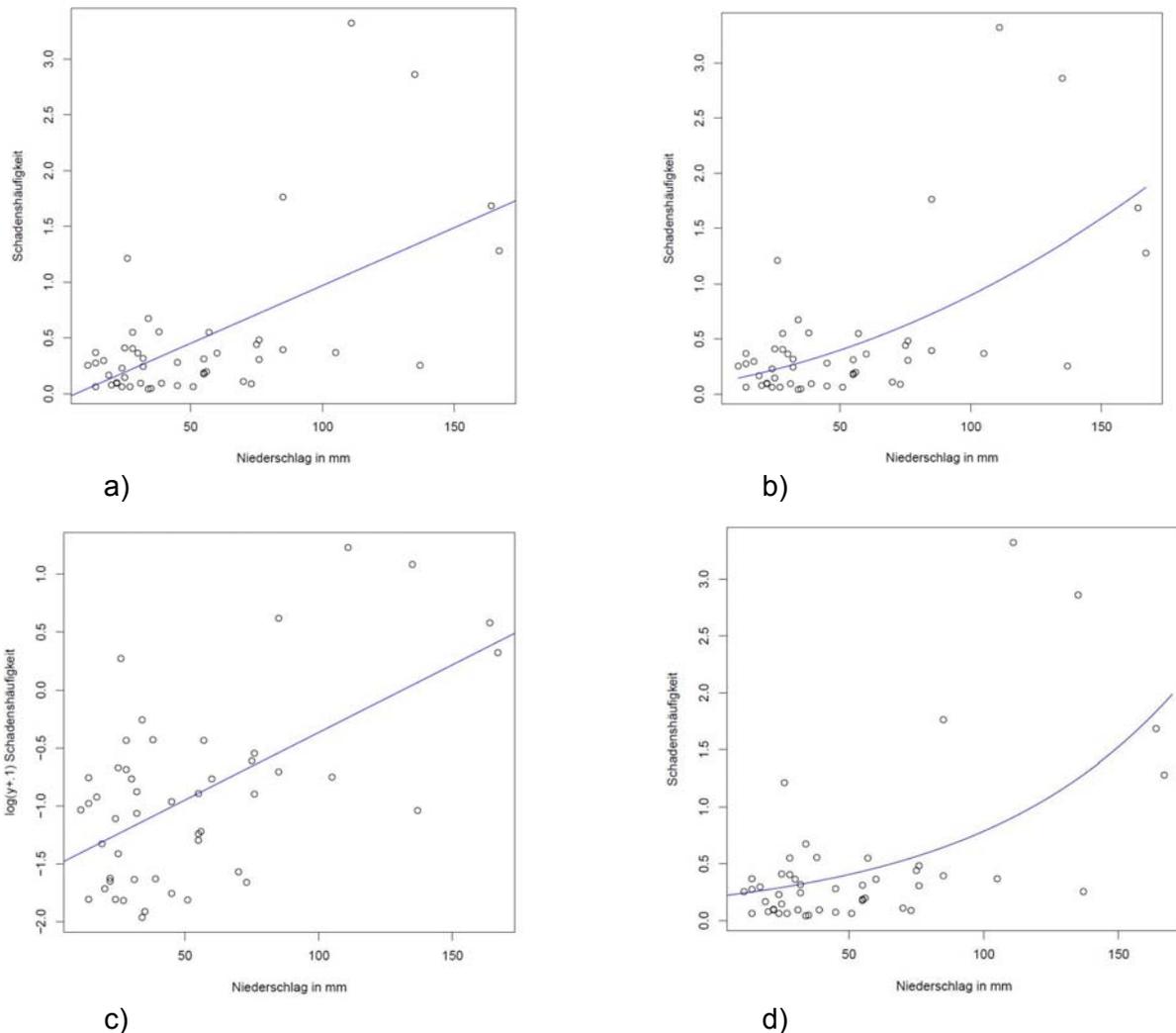


Abbildung 4. Ausgleichskurven für das Ereignis 13, a) linear, b) quadratisch, c) logarithmisch, d) exponentielle

Ergebnisse

Die Karten der Ereignisse liefern einen ersten guten Überblick über die räumliche Verteilung der Schäden und der Niederschlagsmengen (siehe Abbildung 3). Es zeigt sich, dass häufig in den Regionen mit hohen Schäden auch hohe Niederschlagsmengen registriert wurden. Ebenso existieren aber Landkreise mit hohen Niederschlagsmessungen und nur geringen Schadenaufwänden (z.B. Landkreis Oberallgäu im Südwesten von Bayern), bzw. Landkreise

mit großem Schadenaufwand, aber nur relativ niedrigen Niederschlägen (z.B. Kreis Freising nordöstlich von München).

Es zeigt sich, dass der maximale Niederschlag mit der Schadenhäufigkeit stärker korreliert ist als mit dem Schadensatz oder dem Schadenaufwand. Die folgenden Korrelationswerte beziehen sich auf den Zusammenhang zwischen dem maximalen Niederschlag und der Schadenhäufigkeit. Bei der ereignisbezogenen Betrachtungsweise wurde der Mittelwert der Korrelationsergebnisse der einzelnen Starkregenereignisse gebildet. Die Anzahl der Ereignisse (N) schwankt je nach Datensatz und Methode in Bayern zwischen 9 und 19.

Ereignisbezogen:

Das visuell stimmige Bild der Karten (Abbildung 3) schlägt sich in den Korrelationswerten der Ereignisse in Bayern nicht nieder. Bei der ereignisbezogenen Betrachtung auf Kreisebene schwankt der Korrelationskoeffizient je nach Ereignis zwischen -0,44 und 0,56. Die stärkste Korrelation zwischen Schadenhäufigkeit und Niederschlag existiert bei Ereignis 7 mit einem r von 0,56. Die zweit- und drittbeste Korrelation besitzt einen Wert von $r = 0,41$ bzw. $r = 0,36$. Im Durchschnitt aller 18 Ereignisse liegt r bei 0,07 (siehe Tabelle 2 im Anhang).

Potentielle Einflussfaktoren wie die Höhe der Niederschlagsstation, die Anzahl der Tage in Folge mit Niederschlag, der Ausschluss von Extremwerten, die Verwendung von Wertepaaren mit mindestens 25 mm Niederschlag als Tagessumme oder ob ein größerer Vorfluter im Kreis liegt, wurden betrachtet um zu testen ob und welchen Einfluss der einzelne Faktor auf die Korrelation hat. Es hat sich gezeigt, dass keiner der genannten Faktoren einen entscheidenden Einfluss auf die Beschreibung des Zusammenhangs hat bzw. zu einer essentiellen Verbesserung des Korrelationswertes beiträgt.

Im nächsten Schritt wurde eine Differenzierung der Schadensdaten vorgenommen um Gebiete mit geringem Schadenaufwand bzw. kleiner Schadenanzahl auszuschließen. Dafür sind verschiedene Schwellenwerte berücksichtigt worden, beispielsweise ein absoluter Schwellenwert von mindestens 0,2 % Schadenhäufigkeit. In einem weiteren Schritt wurde dieser Schwellenwert um die Bedingung erweitert, dass mindestens 5 Schäden vorliegen müssen. Abschließend wurde eine Kombination des absoluten Schwellenwerts von 0,2% Schadenhäufigkeit mit einem relativen Schwellenwert (nur Schadenanzahlen, die über dem 70. Perzentil der gesamten Schadenanzahlen liegen), getestet.

Je strenger das Schwellenwertkriterium ist umso kleiner wurde die Datenbasis der Wertepaare. Bei 15 Ereignissen in Bayern führte der Schwellenwert von 0,2% Schadenhäufigkeit bei 8 Ereignissen zu einer Verbesserung (Zusammenhang ist stärker) und bei 7 Ereignissen zu einer Verschlechterung (Zusammenhang ist schwächer) des Korrelationswertes r gegenüber der Betrachtung ohne Einschränkung. Im Mittel der 15 Ereignisse führte der Schwellenwert von mindestens 0,2 % Schadenhäufigkeit zu einer Verbesserung des Korrelationswertes r von 0,10 auf 0,15.

Die strengeren Schwellenwerte konnten lediglich bei 11 von 15 Ereignissen (0,2 % und Schadenanzahl von 5) bzw. bei 4 von 15 Ereignissen (0,2 % und Schadenanzahl > 70. Perzentil) getestet werden, da in den anderen Fällen die Datenbasis bzw. die Wertepaare zu stark ausgedünnt wurden und so keine Korrelationsanalyse möglich war.

Für jedes Ereignis existieren mehrere Schadensfunktionen bzw. Ausgleichskurven (linear, quadratisch etc.) die sich in ihrem Bestimmtheitsmaß unterscheiden. Das jeweils größte Bestimmtheitsmaß r^2 der Ereignisse schwankt zwischen 0,0002 und 0,77 und liegt im Durchschnitt aller Ereignisse bei $r^2 = 0,11$.

Für ausgewählte Kreise und 9 Ereignisse erfolgte eine Betrachtung auf Postleitzahlenebene in Bayern. Das Auswahlkriterium für die Kreise war, dass mehr als eine Niederschlagsstation im selben vorhanden sein muss. In Tabelle 2 ist die gemittelte Korrelation der 9 Ereignisse für alle Kreise (alle LK), die ausgewählten Kreise (LK) sowie auf Postleitzahlenebene nach Methode 1 (PLZ 1) und auf Postleitzahlenebene nach Methode 2 (PLZ 2) dargestellt.

Tabelle 2. Gemittelte Spearman-Korrelation von maximalem Tagesniederschlag und Schadenhäufigkeit der Ereignisse sowie die Spearman-Korrelation der Gesamtbetrachtung aller Ereignisse in Bayern.

Methode	Ereignisbezogen	N	Gesamtbetrachtung	N
LK	0.07	19	0.19	682
ausgewählte LK für PLZ	0.24	9	0.25	151
PLZ Methode 1	0.31	9	0.36	71
PLZ Methode 2	0.04	9	0.19	202

In Tabelle 1 wird deutlich, dass die räumliche Verfeinerung auf Postleitzahlenebene unter der Verwendung von Methode 1, bei der eine direkte Zuordnung von Niederschlagsstation und Postleitzahlgebiet erfolgt, den größten Korrelationswert ($r = 0,31$) aufweist. Methode 2, in der mit einem räumlichen Puffer gearbeitet wird, weist eine deutlich geringere Korrelation als Methode 1 auf bzw. der Zusammenhang zwischen Niederschlag und Schaden ist bei dieser Methode der schwächste ($r = 0,04$).

Gesamtbetrachtung aller Ereignisse:

Bei der Analyse aller Ereignisse wird in Tabelle 1 deutlich, dass trotz kleinster Anzahl an Wertepaaren ($N=71$) die Betrachtung auf Postleitzahlenebene unter Verwendung von Methode 1 den größten Korrelationswert ergibt ($r = 0,36$). Die Korrelationswerte nehmen wie bei der ereignisbezogenen Betrachtung mit Zunahme der räumlichen Verfeinerung von allen Kreisen über ausgewählte Kreise bis zur Postleitzahlenebene (Methode 1) zu. Aus diesem Grund wird bei der Analyse für NRW lediglich Methode 1 angewendet. Den kleinsten Korrelationswert weist wieder Methode 2 der Betrachtung auf Postleitzahlenebene auf. Die Korrelationswerte bei Gesamtbetrachtung aller Ereignisse sind größer als bei der ereignisbezogenen Betrachtung.

3.3.2 Nordrhein-Westfalen

In diesem Abschnitt werden das methodische Vorgehen für die Analyse des Zusammenhangs von Starkregen und Versicherungsschäden sowie die Analyseergebnisse im Bundesland Nordrhein-Westfalen dargestellt.

Daten und Methoden

Das methodische Vorgehen in NRW entspricht dem in Bayern. Der Datenaufbereitung schließt sich die räumliche Zuordnung an, gefolgt von der statistischen Analyse. Durch die andere Datenbasis in NRW (partielle Serien, Minutenwerte) ist neben der räumlichen Differenzierung (Postleitzahlenebene vs. Kreisebene) auch eine zeitliche Differenzierung (Tagessummen vs. Stundenwerte) der Daten möglich. Grundlage bilden die zwei Niederschlagsmessnetze, wobei eines Tagessummen registriert und das andere Minutenwerte erfasst. Aus den Minutenwerten wurden einstündige sowie 24-stündige Niederschlagswerte gebildet. Eine Unterteilung in weitere Zeitschritte wäre ein Ansatzpunkt für spätere Untersuchungen.

Eine Untersuchung der Schadensdaten hat gezeigt, dass nicht alle großen Schadensereignisse durch die Ereigniszeiträume des GDV abgedeckt sind. Eine Analyse der Schadenanzahl und des Schadenaufwands in NRW im Zeitraum 2002 bis 2008 hat drei weitere potentielle Starkregenereigniszeiträume ergeben.

Für die Betrachtung von Stundenwerte in NRW wurden nicht nur die Ereigniszeiträume des GDV betrachtet. Grundlage der zeitlichen Verfeinerung bildet die Reduzierung eines

Ereigniszeitraums des GDV auf ein oder zwei dreitägige Betrachtungsfenster (3 Tageszeiträume in Tabelle 3) Es erfolgte eine Identifizierung der Tage mit den meisten Schäden. Das Kriterium bildete dabei die Schadenhäufigkeit. Um den Tag mit der größten Schadenhäufigkeit wurden die zwei angrenzenden Tage gewählt, welche in der Summe die größte Schadenhäufigkeit aufweisen. Aus Ereignis 8 (26.5. bis 14.6.2003) wird beispielsweise Ereignis 8B (2. bis 5.6.2003) und Ereignis 8 (7. bis 10.6.2003) (siehe Tabelle 1b im Anhang). Abschließend wurden die Maximalwerte der Tagessummen bzw. der stündlichen Niederschlagswerte pro Station identifiziert.

In den beiden Stationsmessnetzen existiert ein Messstandort (Versetalsperre, ID 48128574) an dem beide Messverfahren (Tageswerte, Minutenwerte) durchgeführt werden. Im Vergleich der partiellen Serien auf Tageswertbasis mit den aufsummierten 24-stündigen Minutenwerten zeigen sich deutliche Unterschiede. Obwohl an einem Datum durch beide Messverfahren Niederschlag registriert wurde, existieren Differenzen von 10 mm in der Tagessumme. Beide Messverfahren registrieren mal mehr, mal weniger Niederschlag als das jeweilig andere. In der Regel werden die drei höchsten Messwerte pro Jahr an einer Station verwendet um eine partielle Serie daraus abzuleiten. Bei Tagessummen werden andere Ereignistrennkriterien verwendet als bei Minutenmesswerten. So werden bei Tageswerten teilweise der Vor- und Folgetag des Extremereignisses in der partiellen Serie erfasst. Bei Minutenwerten liegen die Zeitfenster häufig innerhalb eines Tages. Die Aufsummierung der partiellen Serie führt deshalb bei Tageswerten zu größeren Summen als bei Minutenwerten.

Aus diesem Grund sind Minutenwerte, die zu 24-stündigen Werten aufsummiert werden, nicht vergleichbar mit denen des Tagesmessnetzes und die statistischen Analysen der Datensätze muss getrennt erfolgen.

Das methodische Vorgehen der räumlichen Zuordnung auf Kreisebene entspricht dem für Bayern angewandten Vorgehen Die Betrachtung auf Postleitzahlenebene konnte in NRW ohne räumliche und zeitliche Einschränkung durchgeführt werden, wobei ausschließlich Methode 1 angewandt wurde. In NRW erfolgte die räumliche Zuordnung für zwei verschiedene Messnetze sowie zeitlich verschieden aufgelöste Niederschlagsmesswerte. Neben dem Tagessummenmessnetz wurden Wertepaare (Schaden/Niederschlag) von Stunden- bzw. 24-Stunden Werte auf Kreis- sowie Postleitzahlenebene betrachtet. Wie zuvor in Bayern erfolgte auch in NRW neben der ereignisbezogenen auch eine Gesamtbetrachtung aller Ereignisse der einzelnen Datensätze (Stundenwerte, Tagessummen, Kreisebene, Postleitzahlenebene etc.). Dabei bildeten die Wertepaare der einzelnen Ereignisse zusammen einen Datensatz, welcher statistisch analysiert wurde. Die Anzahl der Wertepaare bei Gesamtbetrachtung aller Ereignisse schwankt in NRW zwischen 361 und 825, je nach Datensatz (siehe Tabelle 3 und 4).

Ergebnisse

Im ersten Schritt erfolgte die Analyse des Messnetzes, welches Tagessummen registriert. Im Mittel über 17 Ereignisse liegt die Korrelation bei $r = 0,22$. Eine Ursache für den stärkeren Zusammenhang im Vergleich zu Bayern ($r = 0,07$) könnte das dichtere Messnetz in NRW sein. Im Gegensatz zu Bayern führt die räumliche Verfeinerung auf Postleitzahlenebene bei den Tagessummen sowohl bei der ereignisbezogenen ($r = 0,15$) als auch bei der Gesamtbetrachtung aller Ereignisse zu einer Verschlechterung der Korrelation. Die Verwendung des Schwellenwertes von mindestens 0,2 % Schadenhäufigkeit verschlechtert die mittlere Korrelation der Ereignisse. Bei der Gesamtbetrachtung alle Wertepaare korreliert der maximale Niederschlag mit der Schadenhäufigkeit auf Kreisebene ($r = 0,32$) stärker als auf Postleitzahlenebene ($r = 0,25$). Bei dem Wechsel von Kreisebene auf Postleitzahlenebene verkleinert sich die Datenbasis von 730 Wertepaaren (Kreisebene) auf 438 Wertepaare (Postleitzahlenebene). Tabelle 3 fasst die Ergebnisse der statistischen Analyse für die Tagessummen in NRW zusammen.

Tabelle 3. Gemittelte Korrelation der Ereignisse sowie die Korrelation der Gesamtbetrachtung aller Ereignisse nach Spearman für die Variablen maximaler Tagesniederschlag und Schadenhäufigkeit in NRW auf Basis von Tagessummen.

Tagessummen (GDV Zeitraum)	Ereignisbezogen	N	Gesamtbetrachtung	N
LK	0.22	21	0.32	730
PLZ Methodik 1	0.15	17	0.25	438

Der nächste Arbeitsschritt umfasst die Auswertung des Messnetzes auf Minutenbasis und die daraus abgeleiteten Stunden- bzw. 24 h-Werte. Grundlage der zeitlichen Verfeinerung ist die Reduzierung eines Ereigniszeitraums auf maximal zwei dreitägige Betrachtungsfenster (Tabelle 1b im Anhang). Da Starkregenereignisse häufig von kurzer Dauer sind, war das Ziel mit Hilfe von einstündigen Messwerten den Zusammenhang zwischen Schaden und Niederschlag besser quantifizieren zu können als auf Basis von Tagessummen.

Ereignisbezogen:

Im ereignisbezogenen Vergleich von Stundenwerten und 24-stündigen Werten ist die Veränderung des Korrelationskoeffizienten minimal und dazu nicht einheitlich. Auf Kreisebene ist der Zusammenhang zwischen Niederschlag und Schaden bei den 24-stündigen Werten ($r = 0,38$) um 0,02 stärker als bei den Stundenwerten ($r=0,36$). Bei der Betrachtung der Postleitzahlenebene ist der Korrelationskoeffizient der Stundenwerte ($r = 0,47$) um 0,05 größer als bei den 24-stündigen Werten ($r = 0,42$).

Um zu testen, welchen Einfluss die Eingrenzung auf dreitägige Betrachtungsfenster im Vergleich zu den längeren Zeiträumen des GDV auf den Korrelationswert haben, wurde mit dem gleichen 24-stündigen Datensatz die Zeitraumdefinitionen des GDV betrachtet. Bezogen auf die Ereignisse wird deutlich, dass der Korrelationskoeffizient bei der zeitlich exakteren Eingrenzung (3 Tage) auf beiden räumlichen Betrachtungsebenen ($r = 0,38$, $r = 0,42$) größer ist als bei den längeren Zeiträumen ($r = 0,33$, $r = 0,39$). In allen drei Fällen ist der Korrelationskoeffizient bei der räumlichen Verfeinerung (Postleitzahlenebene) größer als auf Kreisebene. In Tabelle 4 sind diese Ergebnisse tabellarisch zusammengefasst.

Tabelle 4. Gemittelte Korrelation der Ereignisse sowie die Korrelation der Gesamtbetrachtung aller Ereignisse nach Spearman für die Variablen maximaler Tagesniederschlag und Schadenhäufigkeit in NRW auf Basis von aufsummierten Minutenwerten.

Minutenwerte	Ereignisbezogen	N	Gesamtbetrachtung	N
24 Stundenwerte (GDV Zeitraum)				
LK	0.33	23	0.39	809
PLZ Methode 1	0.39	22	0.31	497
24 Stundenwerte (3 Tageszeiträume)				
LK	0.38	32	0.41	816
PLZ Methode 1	0.42	29	0.27	361
1 Stundenwerte (3 Tageszeiträume)				
LK	0.36	32	0.45	825
PLZ Methode 1	0.47	29	0.26	370

Gesamtbetrachtung aller Ereignisse:

Der Korrelationskoeffizient nimmt mit der zeitlichen Verfeinerung auf Kreisebene von 24-stündigen Werten (GDV Zeitraum $r = 0,39$) über 24-stündigen Werten (3 Tageszeitraum $r = 0,41$) bis zu einstündigen Werten (3 Tageszeitraum $r = 0,45$) minimal zu. Der Korrelationskoeffizient auf Postleitzahlenebene liegt bei allen drei Stufen immer unter dem der Kreisebene. Einhergehend mit der Betrachtung der Postleitzahlenebene findet jeweils

eine ungefähre Halbierung der Datenbasis (N) statt, was eine Erklärung für den kleineren Korrelationskoeffizienten sein könnte (Tabelle 4).

Fazit des ereignisbezogenen Ansatzes

In den beiden betrachteten Bundesländern Bayern und Nordrhein-Westfalen und in allen Datensätzen zeigt sich, dass der Korrelationskoeffizient auf Kreisebene bei Gesamtbetrachtung aller Ereignisse immer größer ist als bei ereignisbezogener Betrachtung. Hintergrund ist, dass die Datenbasis von ereignisbezogenen Betrachtungen (N= zweistellig) bedeutend kleiner ist als bei der Gesamtbetrachtung (N = dreistellig). Einzelne Ereignisse mit einer geringen Korrelation bilden somit Ausreißer, die bei der Gesamtbetrachtung untergehen oder relativiert werden. Um einen guten Zusammenhang zwischen Niederschlag und Schaden bei einer ereignisbezogenen Betrachtung zu erreichen (siehe Fallstudien), sollte eine exakte Ereignisabgrenzung (taggenau) erfolgen. Die teilweise langen Ereigniszeiträume des GDV ermöglichen dies zwar nicht; die Daten liegen aber so vor, dass eine taggenaue Ereignisabgrenzung sinnvoll möglich ist.

Die räumliche Zuordnung sollte so exakt wie möglich erfolgen. Ein Stationsmessnetz mit lokal beeinflussten Punktmessungen kann nicht ohne weiteres verfeinert werden. Die räumliche Übertragung in benachbarte Gebiete bringt keine Verbesserung der Korrelation. Die räumliche Verfeinerung bildet die Grundvoraussetzung für die zeitliche Verfeinerung. Ohne eine räumlich hochaufgelöste Erfassung des Niederschlags bringt die zeitlich-feine Charakteristik auf Minuten- oder Stundenbasis keine Verbesserung. Der Prozess vom Niederschlag bis hin zum Schaden ist sehr komplex, so dass dieser Zusammenhang nicht allein durch den Faktor Niederschlag erklärt wird. Ferner wird die Wirkungskette vom Niederschlag zu einem gemeldeten Versicherungsschaden von vielen Faktoren bestimmt wie Bevölkerungsdichte, Bauungsart, Topographie, Versicherungsdichte, Landnutzung und anderen. Die einzelnen Einflussfaktoren müssen identifiziert und quantifiziert werden.

3.4 Regionalbezogener Ansatz

Da die Ergebnisse der ereignisbezogenen Untersuchung nicht zufriedenstellend waren, wurde in einem zweiten Ansatz das Bundesland Bayern grob in die drei Regionen Voralpenland, Mittelgebirge und „Rest“ eingeteilt.

Basis für diesen Ansatz ist die Annahme, dass ein bestimmter Typ von Niederschlagsereignissen bevorzugt in bestimmten Regionen auftritt und dort zu Schäden führt. Es könnte also eine Region von bestimmten Niederschlagsereignissen dominiert sein, und daher einen deutlicheren Zusammenhang zwischen Niederschlägen und Schäden zeigen, als andere Regionen. Dies könnten z.B. Stauniederschläge im Voralpenland sein. Durch Filterung des Gesamtdatenbestandes nach dieser einfachen Einteilung soll ein erster Eindruck gewonnen werden, ob eine spätere Verfeinerung dieser Methode erfolgversprechend sein kann.

Für die Analyse wurden Scatterplots basierend auf der kompletten Datengrundlage erstellt (d.h. alle Kreise, alle Tage). Da rein visuell aus dem Scatterplot kein Zusammenhang ersichtlich ist, wurde ein Polynom zweiter Ordnung an die Daten gefittet. Insbesondere im Bereich von hohen Niederschlägen und hohen Schadenhäufigkeiten ist die Datenbasis relativ gering, so dass man vermuten kann, dass die gefittete Funktion stark abhängig ist von diesen wenigen Werten. Um zu untersuchen, wie aussagekräftig diese gefitteten Funktionen sind, wurde ein Unsicherheitsmaß wie folgt definiert:

Aus den Ausgangsdaten wurde mit Hilfe eines Bootstrapping-Verfahrens 200 Datensamples erstellt. Diese beinhalten dieselbe Anzahl von Daten wie die Ausgangsdaten und wurden aus diesen „mit Zurücklegen“ gezogen. Der Mittelwert dieser Samples (grüne Linie) sowie der

Bereich, der aufgespannt wird von der doppelten Standardabweichung der Samples, wurden in Abbildung 5 als grüne Linie, bzw. grüner Bereich gekennzeichnet. Die schwarze Linie markiert die ursprünglich angepasste Kurve.

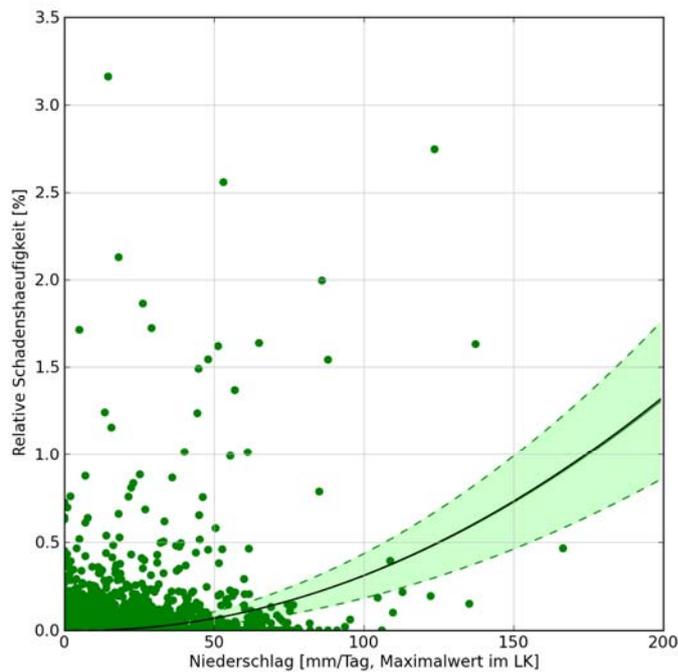


Abbildung 5. Tagesniederschläge [mm/Tag] aufgetragen gegen Schadenhäufigkeiten [%] für die Jahre 2004 bis 2008. Gefittetes Polynom 2. Ordnung sowie das im Text beschriebene Unsicherheitsmaß.

Aus Abbildung 5 wird ersichtlich, dass es möglich, aber nicht unbedingt sinnvoll ist, eine Funktion an die Daten zu fitten. Die Funktion zeigt zwar prinzipiell das erwartete Verhalten, repräsentiert aber nur bedingt die tatsächlichen Werte. Zudem zeigt die Unsicherheitsanalyse, dass die Funktion im Bereich der hohen Werte relativ stark abhängig ist von wenigen Wertepaaren.

Dieselbe Analyse wurde wiederholt, jedoch wurden nur Wertepaare berücksichtigt, die in den als Voralpenland definierten Kreisen auftraten. Das Ergebnis ist in Abbildung 6 zu sehen. Hier zeigt sich, dass im Voralpenland tatsächlich höhere Schäden in Zusammenhang mit starken Niederschlägen vermehrt auftreten, verglichen mit dem ungefilterten Datensatz. Dies zeigt sich auch in der gefitteten Funktion. Allerdings zeigt die Breite des blau gefüllten Bereiches auch eine deutliche Zunahme der statistischen Unsicherheit dieses Zusammenhangs.

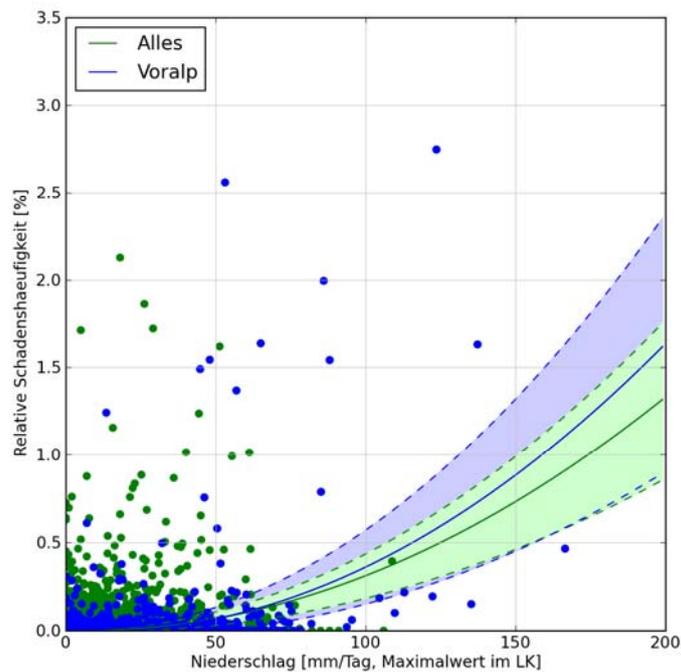


Abbildung 6.
Tagesniederschläge [mm/Tag] aufgetragen gegen Schadenhäufigkeiten [%] für die Jahre 2004 bis 2008. Gefittetes Polynom 2. Ordnung sowie das im Text beschriebene Unsicherheitsmaß. Grün: alle Daten (siehe Abbildung 5), blau: nur Kreise im Voralpenland.

Fazit des regionalbezogenen Ansatzes

Eine Einteilung der Daten in sinnvoll gewählte Regionen besitzt das Potential den Zusammenhang zwischen Schaden und Niederschlag besser zu beschreiben. Es ist anzunehmen, dass die Beziehung zwischen Schaden und Niederschlag regional differenziert beschrieben werden muss. Diese Methode erfordert eventuell eine Kombination mit Wetterlagenklassifikationen (siehe Kapitel 3.6)

3.5 Fallstudien Wuppertal und Dortmund

3.5.1 Ziel und Aufgabenstellung

Im Folgenden werden die Ergebnisse des detaillierten Studiums zweier extremer, schadensverursachender Niederschlagsereignisse dargestellt. Anhand dieser Fallstudien soll untersucht werden, ob es auf kleinräumiger Skala und für ein zeitlich und räumlich begrenztes Ereignis möglich ist, unter Einbeziehung von Radar-Niederschlagsmessungen und postleitzahlen-genauen Schadensdaten eine Schadensfunktion zu bestimmen.

Nicht nur in der Meteorologie, auch im Hinblick auf Schadensereignisse, werden häufig räumliche Skalen unterschieden: „Eine definierte Abgrenzung einzelner Skalenebenen ist nicht immer möglich. In der Regel jedoch bezieht sich die Mikroskala auf die lokale Ebene, auf der beispielsweise einzelne Hochwasserschutzmaßnahmen geplant und in ihren Auswirkungen aufgrund erhobener Daten konkret bewertet werden. Die Mesoebene umfasst dagegen die regionale Ebene, auf der Hochwasserschutzstrategien für Flussgebietseinheiten geplant und bewertet werden. Die Makroskala bezieht sich beispielsweise auf die Planung grundlegender Strategien für gesamte Flusseinzugsgebiete. Die Grenzen sind jedoch häufig fließend und können je nach Betrachtungskontext variieren.“ (UBA, 2008). Auf Basis der

jeweils vorliegenden Daten muss dann entschieden werden, welche Skala die geeignete für eine Schadensabschätzung ist.

Hatzfeld et al. (2008) arbeitete auf der Mikroskala, indem für Überflutungen versucht wurde, Wassertiefen mit Schadenshöhen zu vergleichen. Dabei wurden die Ansätze, die für Flusshochwasser entwickelt wurden, auf kleinräumige Niederschläge übertragen.

3.5.2 Daten und Methoden

Eines der Probleme bei kleinräumigen Starkregen ist, dass es keine vorgegebenen Fließwege oder Abflussprofile gibt, an denen die üblichen wassertiefenabhängigen Schadensfunktionen überprüft bzw. gemessen werden können. Deshalb wurde in der vorliegenden Untersuchung nicht direkt auf Fließtiefen Bezug genommen, sondern ein solcher Zusammenhang nur indirekt berücksichtigt.

In den vorliegenden Fallstudien stehen auf der Schadensseite Daten in einer Auflösung von PLZ-Bezirken zur Verfügung. Damit ist die kleinstmögliche Skala eine Mesoskala, bei der versucht wird, verschiedene vorliegende Informationen miteinander zu verknüpfen, um den Schaden gut beschreiben zu können. Diese Informationen sind Niederschlag, Landnutzung, Topografie, Bemessungsgrößen der Gewässer und Kanalisationen auf der einen Seite und die gemeldeten Schäden und bestehenden Versicherungspolicen auf der anderen Seite.

Genutzte Daten:

Die Untersuchung fand einerseits auf visueller Ebene mittels GIS statt und zum anderen wurden die Ergebnisse im Anschluss statistisch ausgewertet. Zu Grunde liegende Daten für die Statistik waren für jedes der beiden untersuchten Ereignisse:

- angeeichte Radardaten (Ereignissummen) auf einem 1°x1km-Raster (siehe Abbildung 7) um den Radarstandort Essen-Bredeney (bereitgestellt von der Emschergenossenschaft für die Fallstudie Dortmund und dem Wupperverband für die Fallstudie Wuppertal)
- maximale Stundensummen der eben genannten Radardaten (bereitgestellt von der Emschergenossenschaft für die Fallstudie Dortmund und dem Wupperverband für die Fallstudie Wuppertal)
- Schadenaufwand je PLZ-Bezirk
- Schadenanzahl je PLZ-Bezirk
- Anzahl der Versicherungsverträge je PLZ-Bezirk
- Versicherungssumme je PLZ-Bezirk

Weitere Daten:

Es zeigte sich, dass darüber hinaus weitere Daten nützlich sein können, wenn sie in einer Mindestqualität vorliegen, also plausibel sind. Das ist insbesondere für frei zugängliche Daten nicht unbedingt der Fall, da sie entweder nicht genau genug geprüft wurden, für andere Zwecke erhoben wurden oder einfach nicht mehr aktuell sind. Zu den weiteren Daten, die für eine vertiefte Untersuchung hilfreich sein können, gehören:

- Landnutzungsdaten
- Digitales Geländemodell
- Gewässerinformation/daten
- Gebäudeinformationen/daten
- Bevölkerungsdichte

Für einen statistischen Vergleich wurden die radarbasierten Niederschlagsdaten (Messflächengröße < 1 km²) auf PLZ-Bezirke flächengenau umgerechnet. Dies erfolgte zum einen in Form eines mittleren Niederschlages und zum anderen als maximaler Niederschlag innerhalb des PLZ-Bezirk.

Datenanalyse:

Es zeigte sich, dass nicht nur bei den Schadensdaten eine Interpretation bzw. Erhöhung der räumlichen und zeitlichen Genauigkeit notwendig war für einen Vergleich mit kleinräumigen Niederschlagsdaten. Auch viele Zusatzdaten, wie z.B. öffentlich verfügbare Landnutzung waren nicht von genügender Qualität, um konsistente und plausible Ergebnisse zu ermöglichen. Aus diesem Grunde muss eine genaue Datenvorverarbeitung mit Qualitätskontrolle stattfinden.

Damit ergaben sich für eine einfache Regression (polynomischer Ausgleich) folgende Statistiken:

Tabelle 5. Berechnete Statistiken für die beiden Fallstudien

		Schäden			
		Schadenanzahl	Schadenaufwand	Schadensatz	Schadenhäufigkeit
Niederschlag	Ereignissumme (Mittelwert)	x	x	x	x
	Ereignissumme (Maximum)	x	x	x	x
	Max. Stundensumme (MW)	x	x	x	x
	Max. Stundensumme (Max)	x	x	x	x

Diese Statistiken wurden für jede Fallstudie berechnet. Zusätzlich wurde unterschieden zwischen dem vollständigen Spektrum des Niederschlages und der Einschränkung des Niederschlages auf die bemessungsrelevanten Niederschlagsmengen (s.u.).

3.5.3 Fallstudie Wuppertal

Das Ereignis vom 6.8.2007 in Wuppertal führte kleinräumig zu lokalen Schäden. Die örtliche maximale Niederschlagsmenge betrug über 70 mm. Die Anzahl der gemeldeten Schäden war mit 36 recht gering.

Abbildung 7 zeigt die räumliche Ausprägung des Ereignisses über dem Einzugsgebiet der Wupper (rote Linie), und Abbildung 8 die gemeldeten Schäden (nach PLZ-Bezirk) farbig, Gebiete mit Policen ohne Schäden in grau. In Abbildung 9 sind die Niederschläge ab 36 mm maximaler Stundensumme über die Schadensinformationen gelegt. Dabei wird deutlich, dass es Gebiete hohen Niederschlages gibt, in denen keine Policen vorhanden sind und daher auch keine Schäden gemeldet wurden.

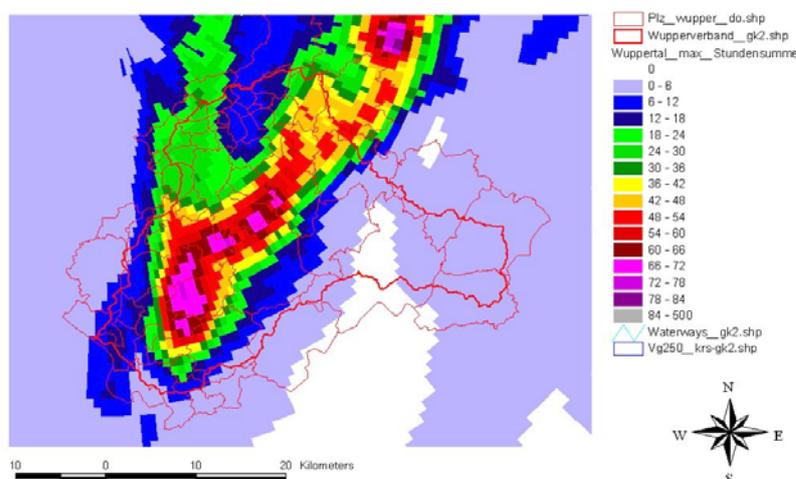


Abbildung 7. Räumliche Ausprägung des Niederschlagsereignisses (hier: maximale Stundensumme in mm aus angeichteten Radardaten)

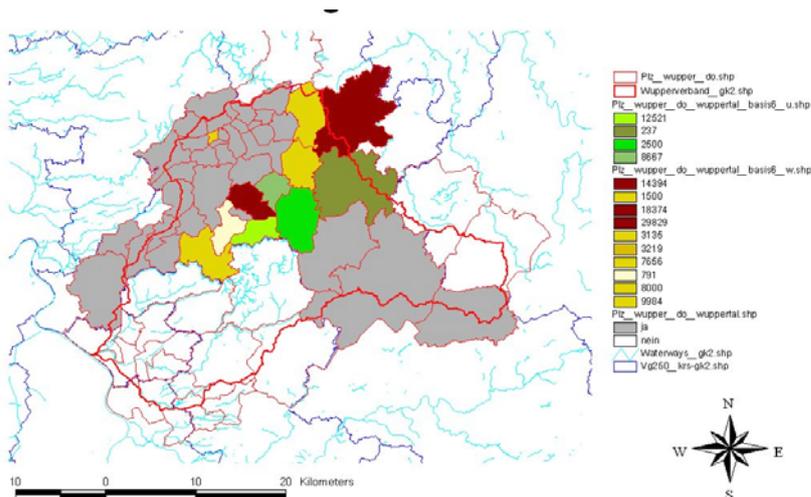


Abbildung 8. Räumliche Verteilung der gemeldeten Schäden (farbig) und räumliche Verteilung der Policen (grau + farbig)

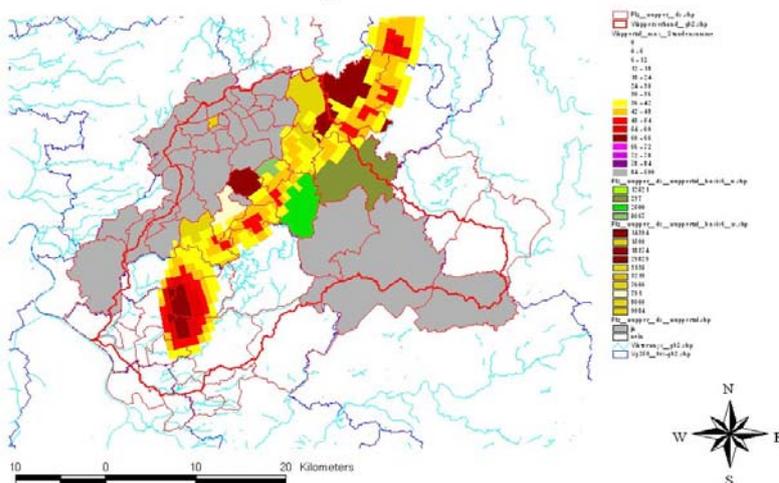


Abbildung 9. Überlagerung der Schadenhäufigkeit mit den maximalen Stundensummen

Tabelle 6 zeigt die Auswertung der Regressionswerte (Gütemaß) zwischen Schadensparametern und Niederschlag. Die untersuchten Schadensparameter waren Schadenanzahl, Schadenaufwand, Schadensatz und Schadenhäufigkeit. Die Niederschlagsparameter wurden unterschieden in Gesamtsumme Ereignis und maximale Stundensumme (jeweils für Maximalwert in einem PLZ-Bezirk oder Mittelwert über einen PLZ-Bezirk). Die maximale Stundensumme wurde deshalb gewählt, weil sie aufgrund der geringen Reaktions- und Fließzeiten im urbanen Raum aussagekräftiger für städtische Entwässerungssysteme ist als die Gesamtsumme eines Ereignisses.

Tabelle 6. Auswertung der Regression zwischen je einem Niederschlagsparameter und einem Schadensparameter für die Fallstudie Wuppertal

		Schäden			
		Schadenanzahl	Schadenaufwand	Schadensatz	Schadenhäufigkeit
Niederschlag	Ereignissumme (Mittelwert)	0.55	0.4	0.51	0.52
	Ereignissumme (Maximum)	0.68	0.58	0.55	0.47
	Max. Stundensumme (MW)	0.59	0.44	0.51	0.57
	Max. Stundensumme (Max)	0.66	0.55	0.53	0.49

Betrachtet man die Ausgleichskurve der am besten passenden Beziehung, so fällt auf, dass Schäden bei der Betrachtung von Maximalniederschlägen je PLZ-Bezirk insbesondere oberhalb einer Grenze von etwa 50 mm auftreten. Bei mittleren Niederschlägen je PLZ-Bezirk liegt diese Grenze zwischen 35 und 40 mm.

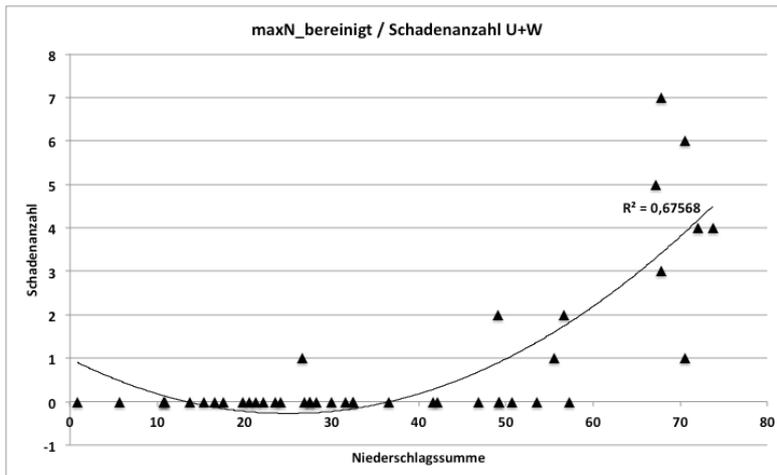


Abbildung 10. Polynomischer Ausgleich zwischen der Ereignissumme (Maximum je PLZ-Bezirk) und der Schadenanzahl

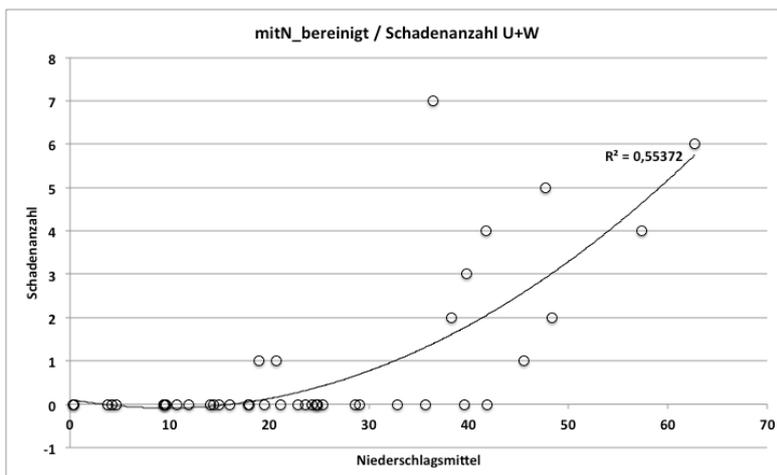


Abbildung 11. Polynomischer Ausgleich zwischen der Ereignissumme (Mittelwert je PLZ-Bezirk) und der Schadenanzahl

Die Extremwertstatistik nach KOSTRA (Malitz 2005, Bartels et al. 2005) des DWD zeigt, dass das Ereignis von Wuppertal, das dort eine zweistündige Dauer hatte, statistisch eine Wiederkehrhäufigkeit von lokal einmal in 100 Jahren aufwies. Die ausführliche Statistik zeigt, dass ein zweistündiges Ereignis von 38.3 mm eine Wiederkehrzeit von einmal in zehn Jahren aufweist – die Grenze der zulässigen Überflutungshäufigkeit nach DIN EN-752-2 für wasserwirtschaftliche Bauwerke in ländlichen Gebieten, und ein Ereignis von 50 mm einmal in 50 Jahren auftritt – der Grenze für Überflutungen in städtischen Gebieten (vergleiche Tabelle 7).

Tabelle 7. Starkregenstatistik KOSTRA des Deutschen Wetterdienstes für Wuppertal

Niederschlagshöhen und -spenden für Wuppertal

Zeitspanne : Januar - Dezember

Rasterfeld : Spalte: 12 Zeile: 51

T	0,5		1,0		2,0		5,0		10,0		20,0		50,0		100,0	
D	hN	rN	hN	rN	hN	rN	hN	rN								
5,0 min	3,2	107,6	5,1	170,0	7,0	232,3	9,4	314,8	11,3	377,1	13,2	439,5	15,7	521,9	17,5	584,3
10,0 min	5,8	96,0	8,2	136,4	10,6	176,8	13,8	230,2	16,2	270,6	18,7	311,1	21,9	364,5	24,3	404,9
15,0 min	7,4	82,5	10,3	113,9	13,1	145,2	16,8	186,7	19,6	218,1	22,4	249,4	26,2	290,9	29,0	322,2
20,0 min	8,6	71,6	11,7	97,8	14,9	124,0	19,0	158,6	22,2	184,8	25,3	211,0	29,5	245,6	32,6	271,8
30,0 min	10,1	55,9	13,7	76,2	17,4	96,5	22,2	123,4	25,9	143,7	29,5	164,0	34,4	190,9	38,0	211,2
45,0 min	11,2	41,5	15,5	57,2	19,7	73,0	25,3	93,8	29,6	109,6	33,9	125,4	39,5	146,2	43,7	162,0
60,0 min	11,8	32,7	16,5	45,8	21,2	59,0	27,5	76,4	32,3	89,6	37,0	102,8	43,3	120,2	48,0	133,3
90,0 min	13,6	25,3	18,7	34,7	23,8	44,1	30,6	56,6	35,7	66,1	40,8	75,5	47,5	88,0	52,6	97,4
2,0 h	15,1	21,0	20,5	28,5	25,9	35,9	33,0	45,8	38,3	53,2	43,7	60,7	50,8	70,5	56,1	78,0
3,0 h	17,5	16,2	23,3	21,6	29,1	26,9	36,7	34,0	42,4	39,3	48,2	44,6	55,9	51,7	61,6	57,0
4,0 h	19,4	13,5	25,5	17,7	31,6	21,9	39,6	27,5	45,7	31,7	51,7	35,9	59,7	41,5	65,8	45,7
6,0 h	22,4	10,4	29,0	13,4	35,5	16,4	44,1	20,4	50,6	23,4	57,1	26,5	65,9	30,4	72,3	33,5
8,0 h	25,9	8,0	32,9	10,2	39,9	12,3	49,2	15,2	56,2	17,3	63,2	19,5	72,4	22,4	79,4	24,5
12,0 h	28,6	6,6	36,0	8,3	43,4	10,0	53,1	12,3	60,5	14,0	67,9	15,7	77,6	18,0	85,0	19,7
18,0 h	33,4	5,2	40,5	6,3	47,6	7,3	56,9	8,8	64,0	9,9	71,1	11,0	80,4	12,4	87,5	13,5
24,0 h	38,2	4,4	45,0	5,2	51,8	6,0	60,7	7,0	67,5	7,8	74,3	8,6	83,2	9,6	90,0	10,4
48,0 h	48,2	2,8	55,0	3,2	61,8	3,6	70,7	4,1	77,5	4,5	84,3	4,9	93,2	5,4	100,0	5,8
72,0 h	55,2	2,1	65,0	2,5	74,8	2,9	87,7	3,4	97,5	3,8	107,3	4,1	120,2	4,6	130,0	5,0

T - Wiederkehrzeit (in [a]): mittlere Zeitspanne, in der ein Ereignis einen Wert einmal erreicht oder überschreitet

D - Niederschlagsdauer einschließlich Unterbrechungen (in [min, h])

hN - Niederschlagshöhe (in [mm])

rN - Niederschlagsspende (in [l/(s*ha)])

Die andere Eigenschaft, die aus den Abbildungen 10 und 11 hervorgeht, ist dass die Beziehung zwischen Schaden und Niederschlag oberhalb der KOSTRA-Grenze nicht sehr gut bestimmt ist. Das zeigt auch die weitere Auswertung (Abbildung 12).

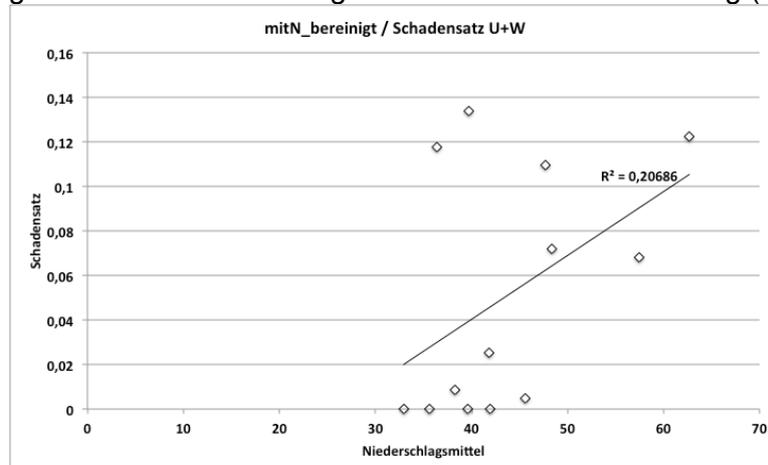


Abbildung 12. Regression zwischen mittlerem Niederschlag und dem Schadensatz für Niederschläge > einmal in 10 Jahren für Wuppertal.

3.5.4 Fallstudie Dortmund

Das Ereignis vom 26.7.2008 in Dortmund führte zu deutlich höheren Schäden als das vorher betrachtete Ereignis. Die örtliche maximale Niederschlagsmenge betrug laut Auswertung in Grünwald et al. (2009) 203 mm, die mit den Bodenstationen der Emschergenossenschaft angeeichten Radarmessungen erreichten ca. 140 mm über die Ereignisdauer von knapp 4 Stunden. Die Anzahl der gemeldeten Schäden war mit 649 deutlich höher als bei der ersten Fallstudie.

Abbildung 13 zeigt die räumliche Ausprägung des Ereignisses über dem Stadtgebiet von Dortmund (rote Linien bezeichnen die PLZ-Bezirke) und Abbildung 14 die gemeldeten

Schäden (nach PLZ-Bezirk) farbig, Gebiete mit Policen ohne Schäden in grau. In Abbildung 15 sind die Niederschläge ab 40 mm Ereignissumme über die Schadensinformationen gelegt.

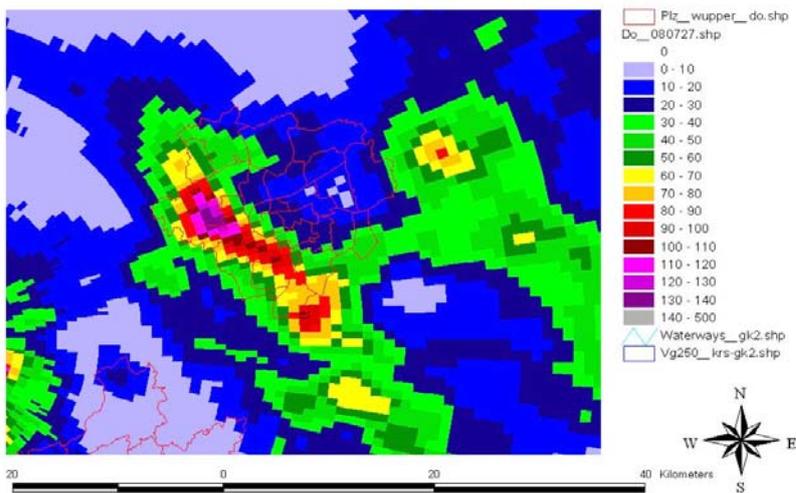


Abbildung 13. Räumliche Ausprägung des Niederschlagsereignisses (hier: Ereignissumme in mm aus angeeichten Radardaten)

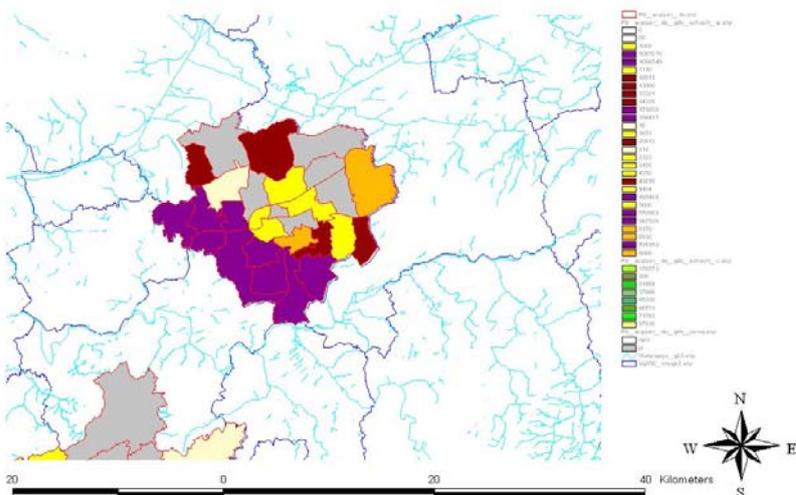


Abbildung 14. Räumliche Verteilung der gemeldeten Schäden (farbig) und räumliche Verteilung der Policen (grau + farbig)

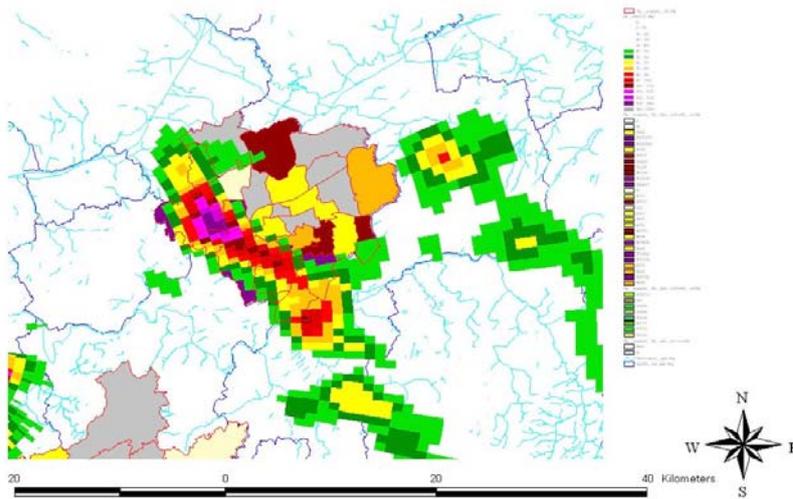


Abbildung 15. Überlagerung der Schadenhäufigkeiten mit den maximalen Ereignissummen

Tabelle 8 zeigt die Auswertung der Regressionswerte (Gütemaß) zwischen Schadensparametern und Niederschlag. Es wurden dieselben Parameter verwendet wie im Ereignis im Wuppergebiet.

Tabelle 8. Auswertung der Regression zwischen je einem Niederschlagsparameter und einem Schadensparameter für die Fallstudie Dortmund

		Schäden			
		Schadenanzahl	Schadenaufwand	Schadensatz	Schadenhäufigkeit
Niederschlag	Ereignissumme (Mittelwert)	0.87	0.75	0.69	0.83
	Ereignissumme (Maximum)	0.7	0.55	0.51	0.65
	Max. Stundensumme (MW)	0.82	0.77	0.76	0.84
	Max. Stundensumme (Max)	0.66	0.63	0.67	0.72

Betrachtet man die Ausgleichskurve der am besten passenden Beziehung, so fällt auf, dass Schäden bei der Betrachtung von Maximalniederschlägen je PLZ-Bezirk insbesondere oberhalb einer Grenze von etwa 50 mm auftreten. Bei mittleren Niederschlägen je PLZ-Bezirk liegt diese Grenze zwischen 35 und 40 mm.

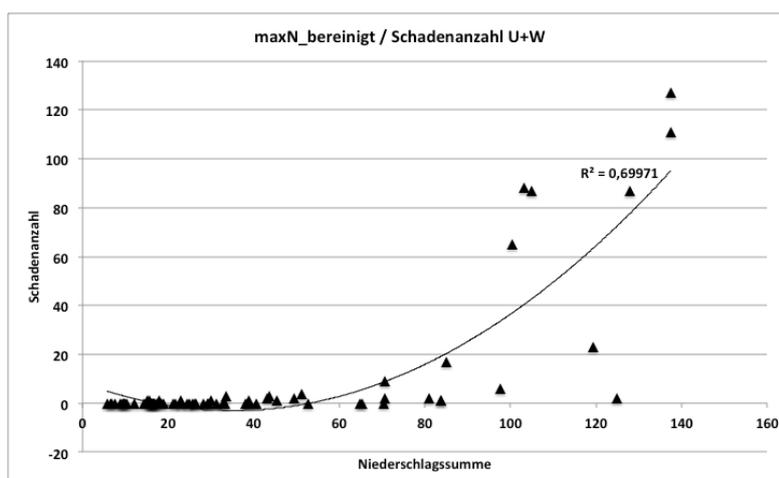


Abbildung 16. polynomischer Ausgleich zwischen der Ereignissumme (Maximum je PLZ-Bezirk) und der Schadenanzahl

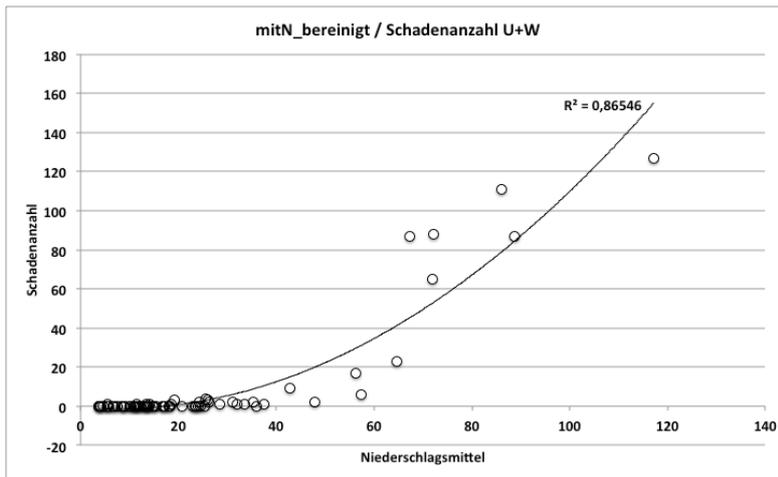


Abbildung 17. polynomischer Ausgleich zwischen der Ereignissumme (Mittelwert je PLZ-Bezirk) und der Schadenanzahl

Die Extremwertstatistik nach KOSTRA des DWD zeigt, dass das Ereignis von Dortmund, das dort eine vierstündige Dauer hatte, statistisch eine Wiederkehrhäufigkeit von lokal seltener als einmal in 100 Jahren aufwies. Die ausführliche Statistik zeigt, dass ein zweistündiges Ereignis von 39,0 mm eine Wiederkehrzeit von einmal in zehn Jahren aufweist – die Grenze der zulässigen Überflutungshäufigkeit nach DIN EN-752-2 für wasserwirtschaftliche Bauwerke in ländlichen Gebieten, und ein Ereignis von 51,4 mm einmal in 50 Jahren auftritt – der Grenze für Überflutungen in städtischen Gebieten (vergleiche Tabelle 9).

Tabelle 9. Starkregenstatistik KOSTRA des Deutschen Wetterdienstes für Dortmund

Niederschlagshöhen und -spenden für Dortmund

Zeitspanne : Januar - Dezember

Rasterfeld : Spalte: 14 Zeile: 48

T	0,5		1,0		2,0		5,0		10,0		20,0		50,0		100,0	
	hN	rN	hN	rN	hN	rN										
5,0 min	3,9	130,0	5,4	179,5	6,9	229,0	8,8	294,5	10,3	344,0	11,8	393,5	13,8	458,9	15,3	508,4
10,0 min	6,4	107,5	8,4	139,4	10,3	171,3	12,8	213,4	14,7	245,3	16,6	277,2	19,2	319,4	21,1	351,3
15,0 min	8,0	89,2	10,3	113,9	12,5	138,6	15,4	171,2	17,6	195,8	19,8	220,8	22,8	253,1	25,0	277,8
20,0 min	9,1	75,7	11,6	96,3	14,0	116,8	17,3	144,0	19,7	164,6	22,2	185,1	25,5	212,3	27,9	232,9
30,0 min	10,4	57,7	13,2	73,6	16,1	89,5	19,9	110,5	22,7	126,4	25,6	142,3	29,4	163,3	32,2	179,2
45,0 min	11,3	42,0	14,7	54,3	18,0	66,6	22,4	82,9	25,7	95,2	29,0	107,4	33,4	123,7	36,7	136,0
60,0 min	11,8	32,8	15,5	43,1	19,2	53,3	24,1	66,8	27,8	77,1	31,4	87,3	36,3	100,9	40,0	111,1
90,0 min	12,9	23,8	17,0	31,4	21,1	39,0	26,5	49,1	30,6	56,7	34,8	64,4	40,2	74,4	44,3	82,1
2,0 h	13,6	19,0	18,1	25,1	22,5	31,3	28,4	39,5	32,9	45,7	37,3	51,8	43,2	60,0	47,7	66,2
3,0 h	14,8	13,7	19,8	18,3	24,8	22,9	31,3	29,0	36,3	33,6	41,3	38,2	47,8	44,3	52,8	48,9
4,0 h	15,8	10,9	21,1	14,7	26,5	18,4	33,6	23,3	35,0	27,1	44,3	30,8	51,4	35,7	56,8	39,4
6,0 h	17,1	7,9	23,1	10,7	29,1	13,5	37,0	17,1	43,0	19,9	49,0	22,7	56,9	26,4	62,9	29,1
8,0 h	18,6	5,8	25,3	7,8	32,0	9,9	40,8	12,6	47,5	14,7	54,2	16,7	63,0	19,5	69,7	21,5
12,0 h	19,8	4,6	27,0	6,3	34,2	7,9	43,8	10,1	51,0	11,8	58,2	13,5	67,8	15,7	75,0	17,4
18,0 h	21,8	3,4	29,8	4,6	37,7	5,8	48,2	7,4	56,1	8,7	64,1	9,9	74,6	11,5	82,5	12,7
24,0 h	23,8	2,8	32,5	3,8	41,2	4,8	52,6	6,1	61,3	7,1	69,9	8,1	81,3	9,4	90,0	10,4
48,0 h	28,1	1,6	37,5	2,2	46,9	2,7	59,3	3,4	68,8	4,0	78,2	4,8	90,6	5,2	100,0	5,8
72,0 h	35,2	1,4	45,0	1,7	54,8	2,1	67,7	2,6	77,5	3,0	87,3	3,4	100,2	3,9	110,0	4,2

- T - Wiederkehrzeit (in [a]): mittlere Zeitspanne, in der ein Ereignis einen Wert einmal erreicht oder überschreitet
- D - Niederschlagsdauer einschließlich Unterbrechungen (in [min, h])
- hN - Niederschlagshöhe (in [mm])
- rN - Niederschlagsspende (in [l/(s*ha)])

Eine weitere Eigenschaft, die aus den Abbildungen 16 und 17 hervorgeht, ist dass die Beziehung zwischen Schaden und Niederschlag oberhalb der KOSTRA-Grenze nicht so gut bestimmt ist. Das zeigt auch die weitere Auswertung (Abbildung 18). Insbesondere die – hier nicht dargestellten – gemeldeten Schäden unterhalb der KOSTRA-Grenze sind zu untersuchen, weil sie auch eine nicht unerhebliche Schadenssumme darstellen. Auch ist zu

prüfen, in welchen Fällen die Ereignissumme und in welchen Fällen die maximale Stundensumme der aussagekräftigere Parameter ist.

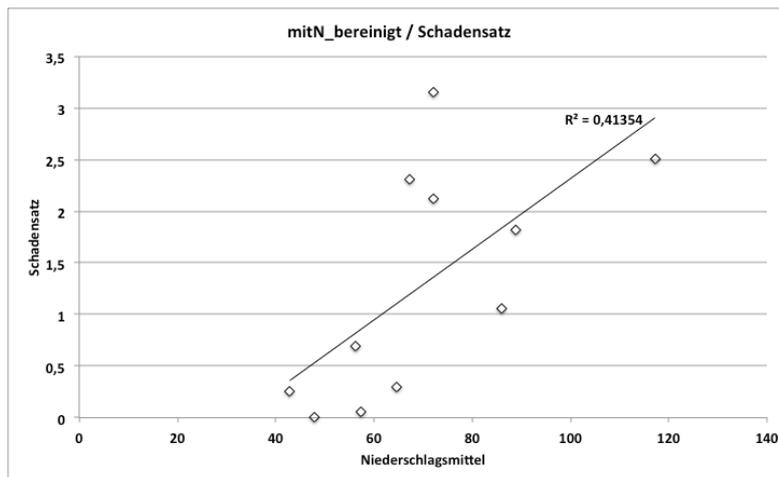


Abbildung 18. Regression zwischen mittlerem Niederschlag und dem Schadensatz für Niederschläge > einmal in 10 Jahren für Dortmund.

Deshalb ist es hier sinnvoll, die untersuchten Parameter mit einer multiplen Regression unter Verwendung der oben genannten „Weitere Daten“ noch zusätzlich im Detail zu untersuchen.

Fazit der Fallstudie

Angeeichte Radarmessungen zeigen räumlich detailliert, wo Starkregen aufgetreten ist. Damit lässt sich auch eine gute bis sehr gute räumliche Übereinstimmung zwischen dem Auftreten von Starkregen und dem Auftreten von Schadensmeldungen zeigen. Es wurde deutlich, dass die Bemessungswerte für Überflutungen aus der DIN-EN 752-2 eine gute Abschätzung für eine Trennung zwischen schadensfreien Gebieten und solchen mit Schäden darstellen.

Die beiden Fallstudien zeigen weiter, dass die Schadenanzahl der am besten zu schätzende Parameter ist. Für Versicherungszwecke sind allerdings die Größen „Schadenaufwand“ und „Schadensatz“ aussagekräftiger. Hier bietet sich der Schadenaufwand an, der in der Fallstudie Dortmund gegenüber dem Schadensatz die bessere Korrelation in der Regressionsuntersuchung ergab. Der Schadenaufwand wird am besten über den mittleren Niederschlag in einem PLZ-Bezirk abgeschätzt. Unterschiede zwischen Ereignissumme und maximaler Stundensumme als Niederschlagsparameter sind gering und wechseln zwischen den Schadensparametern. Für beide Fallstudien ergab sich ein etwas besseres Ergebnis für maximale Stundensummen, was an der vorherrschenden Siedlungsstruktur (städtisch, mit geringer hydrologischer Reaktionszeit) oder an der Niederschlagsart (überwiegend konvektiv, also mit extremen Kurzzeitniederschlagsmengen) liegen kann.

Um Schadenshöhen besser abzuschätzen, ist es sinnvoll,

- im Rahmen einer Sensitivitätsuntersuchung weitere Parameter wie Bevölkerungsdichte, Landnutzung, Topografie, Siedlungsstruktur in eine multiple Regression einfließen zu lassen,
- weitere Ereignisse mit anderer Niederschlagsstruktur/Wetterlage zu untersuchen,
- die Aussagekraft der Parameter Ereignissumme und maximale Stundensumme weiter zu analysieren, um besser feststellen zu können, in welchen Fällen welcher Niederschlagsparameter zu wählen ist,
- zu untersuchen, ob der Detaillierungsgrad „Kreisebene“ (im Vergleich zu den hier verwendeten PLZ-Bezirken) bei Nutzung von Radardaten hinreichend aussagekräftig bleibt

- Ereignisse aus anderen Regionen in Deutschland zu betrachten, damit regionale Klimaunterschiede in den vorherrschenden Starkniederschlagsregimen berücksichtigt werden können.

Ein weiteres Ergebnis war, dass die Beziehung zwischen Schaden und Niederschlag oberhalb dieser Bemessungsgrenze nicht sehr gut bestimmt ist. Für die Absicherung dieser Beziehung sollten daher weitere Kriterien wie z.B. Topographie, Versiegelungsgrad des Bodens, Wetterlagen, etc. hinzugezogen werden.

3.6 Wetterlagenbezogener Ansatz

3.6.1 Wetterlagenklassifizierung der Starkregenereignisse

Die eingegrenzten Zeitabschnitte, in denen den Versicherungen Schäden durch Starkregen gemeldet wurden, werden in Tabelle 12 näher beschrieben. Dabei werden auf der Basis der Berliner Wetterkarte, Jahrgang 2002 und Vol. 52 – Vol. 58 der Jahrgänge 2003 bis 2008 (Berliner Wetterkarte, 2002-2008) die jeweils herrschenden Wetterlagen und kurz gefasste Wettermeldungen für jeden Tag aufgelistet. Die Beschreibungen des Ist-Zustandes reicht vom Mittag des Vortages bis zum Mittag des aktuellen Tages und erschwert teilweise die Zuordnung der Niederschlagsereignisse zum tatsächlichen Datum. In der Tabelle werden die Niederschlagsereignisse den folgenden synoptischen Erscheinungen zugeordnet: Kaltfront, Warmfront, Okklusion, Konvergenzzone, Höhentief, konvektive Ereignisse.

In einer weiteren Spalte ist eine Kennzahl für die Wetterlage auf der Basis der objektiven Wetterlagenklassifikation des Deutschen Wetterdienstes angegeben (Bissolli und Dittmann, 2004).

Die in Tabelle 12 verwendeten Abkürzungen bedeuten:

Tabelle 10. Allgemeine Abkürzungen

N,O,W,S	Nord, Ost, Süd, West
NO, NW, ...	Nordost, Nordwest, ...
KF, WF	Kaltfront, Warmfront
BW	Baden-Württemberg
BY	Bayern
BE	Berlin
BB	Brandenburg
HH	Hamburg
SL	Saarland
SH	Schleswig-Holstein
SA	Sachsen
S-A	Sachsen-Anhalt
HE	Hessen
TH	Thüringen
MV	Mecklenburg-Vorpommern
D	Deutschland
N-D, ...	Norddeutschland, ...

Die Wetterlagenklassen werden nach Anströmrichtung (vier Klassen), Zyklonalität in 950 hPa und 500 hPa und der Feuchte ermittelt. Die 40 Wetterlagenklassen sind in der folgenden Tabelle beschrieben, wobei die fünfstellige Kennung aaz₉₅₀z₅₀₀f bedeutet:
aa Anströmrichtung (XX: keine vorherrschende Richtung, NE, SE, SW, NW).
z₉₅₀ und z₅₀₀: Zyklonalität in 950 hPa und 500 hPa (C: zyklonal, A: antizyklonal)
f: Feuchte (W: feucht, D: trocken).

Tabelle 11 beinhaltet die 40 Wetterlagenklassen.

Tabelle 11 Wetterlagenklassen

1	XXAAD	11	XXACD	21	XXCAD	31	XXCCD
2	NEAAD	12	NEACD	22	NECAD	32	NECCD
3	SEAAD	13	SEACD	23	SECAD	33	SECCD
4	SWAAD	14	SWACD	24	SWCAD	34	SWCCD
5	NWAAD	15	NWACD	25	NWCAD	35	NWCCD
6	XXAAW	16	XXACW	26	XXCAW	36	XXCCW
7	NEAAW	17	NEACW	27	NECAW	37	NWCCW
8	SEAAW	18	SEACW	28	SECAW	38	SECCW
9	SWAAW	19	SWACW	29	SWCAW	39	SWCCW
10	NWAAW	20	NWACW	30	NWCAW	40	NWCCW

Tabelle 12 Episoden mit Schadensereignissen für den Zeitraum der Ereignisse in Tabelle 1 im Anhang sowie damit verbundene Wetterlage, Klassifizierung und Klassifikationsnummer. Nicht eindeutige zuzuordnende Wetterlagen sind mit einem Fragezeichen (?) versehen.

Datum	Wetterlage	Klassifizierung	oWLK
10.05.02	Okklusion des Tiefs ZAIDA II Gewitter im SW	Okklusion	28
11.05.02	Okklusionsfronten über Deutschland, immer zahlreichere Schauer und Gewitter im NO	Okklusion	36
12.05.02	Okklusion überquerte Deutschland anhaltender Regen südlich der Mittelgebirge	Okklusion	9
01.08.02	Luftmassengrenze (NO heiß, SW kühl), KF zahlreiche Gewitter nördlich des Mains	Kaltfront	26
02.08.02	KF überquert D, zahlreiche heftige Gewitter, z.T. sehr viel Niederschlag u. Überschwemmungen in N u.NO	Kaltfront	19
19.08.02	Sonniges heißes Wetter Schauer Emsland, Schwarzwald	Konvektive Ereignisse	26
20.08.02	Tiefdruckrinne + KF zieht nach N kräftige Gewitter (Düsseldorf, Nürburg), nachts verstärkt	Kaltfront	28
21.08.02	KF nach O abgezogen, nachlassende Schauer, mittags wiederauflebend	Kaltfront	36
01.01.03	Temperaturgegensatz N – S, Aufzug Tiefdruckwirbel, nachts ergiebiger Regen (BE)	Kaltfront	9
02.01.03	Durchzug KF nach O, westlich von Rhein u.	Kaltfront	29

Datum	Wetterlage	Klassifizierung	oWLK
	Mittelgebirge (TH, N.BY)		
03.01.03	Abzug KF nach O, reichlich Regen Mitte und S (Überschwemmungen)	Kaltfront	30
04.01.03	Abzug 3.Tief nach O., Noch Regen in SW-Deutschland	Postfrontal (?)	31
03.06.03	Labilisierte subtropische Luft, Regen- und Hagelschauer im W u. SW wenig wetteraktive Luftmassengrenze von SW nach N	Konvektive Ereignis/Kaltfront	29
04.06.03	An Luftmassengrenze Gewitter mit wolkenbruchartigen Niederschläge	Konvektive Ereignisse / Kaltfront	29
05.06.03	Luftmassengrenzen SW nach N, sehr heiß noch im O	Konvektive Ereignisse / Kaltfront	9
06.06.03	Feuchtlabile Luft mit Gewitterzellen und später Gewitterclustern in Mittelgebirge Im W Unwetter in S-A	Postfrontal (?)	9
08.06.03	Feuchtwarme Luft nach N transportiert Schauer im O (nur Radar)	Warmfront (?)	29
09.06.03	Kaltluftvorstoß mit verbreiteten Schauern und Gewittern (W,SW von Hannover, Halle, Potsdam)	Post Kaltfront	4
29.06.05	Hitzewelle mit Bildung einer Gewitterlinie an Luftmassengrenze, unwetterartiger Starkregen NRW	Höhendiffluenz Konvektives Ereignis	10
30.06.05	Nach S ziehende Kaltfront, kräftige Schauer und Gewitter u.a. NRW, BY	Kaltfront und Okklusion	6
01.07.05	Okklusion zieht langsam nach NO, Schauer und Gewitter W und SW	Okklusion	20
28.07.05	Advektion feuchtwarmer Luft, Gewitter mit unwetterartigem Charakter mit Starkregen im W	Warmfront, Konvektive Ereignisse	29
29.07.05	Warmluftzufuhr, zahlreiche Gewitter im W, ziehen nach NO	Warmfront, Konvektive Ereignisse	29
30.07.05	Trog mit Kaltfront über D, sehr labil, großräumige Gewittercluster mit unwetterartigem Starkregen im S, SW, O	Kaltfront	19
31.07.05	Okklusion über dem NW, Regen im Ruhrgebiet bis SH	Okklusion, Dauerregen	19
01.08.05	Abzug Tiefdrucksystem, abklingender Regen	-	4
17.08.05	Höhentief über SO-Europa, vom Allgäu bis Niederbayern anhaltende Niederschläge	Höhentief Dauerregen	1
20.08.05	Kaltfront von W mit verbreiteten Gewittern	Kaltfront	38
21.08.05	Kaltfront zieht nach NO mit kräftigen Gewittern	Kaltfront	27
22.08.05	Einfluss eines Höhentiefs, Regenfälle, örtlich Gewittern südl. Mains	Höhentief (mit Okklusion)	37

Datum	Wetterlage	Klassifizierung	oWLK
23.08.05	Höhentief, ergiebige Dauerniederschläge am Alpenrand, z.T. auch Sachsen, Thüringen	Höhentief	16
24.08.05	Abklingende Niederschläge	-	9
17.06.06	Höhentief, Gewitter Mittel-, Ost-D, z.T. mit Hagel,	Höhentief mit Luftmassengrenze	16
18.06.06	Abziehendes Höhentief	-	9
05.07.06	Tiefdruckrinne mit Konvergenz mit lokalen Gewittern	Konvergenzzone	29
06.07.06	Höhentrog mit Hebungsvorgängen, im SW, später im W Schauer und Gewitter, z.T. unwetterartig, nach O wandernd	Höhentrog	29
07.07.06	Im O unwetterartige Gewitter	Höhentrog	9
22.07.06	Advektion heißer Luft von SW mit Konvergenzzone, Gewitter von SW bis Eifel	Konvergenzzone	6
23.07.06	Nach O abziehende Konvergenzzone, sehr warme Luft	Konvergenzzone	9
27.07.06	Weiter Einfluss der Konvergenzzone, Gewitter im Ruhrgebiet	Konvergenzzone	26
28.07.06	Schwachgradientig. Subtropische Warmluft, Gewitter in Niedersachsen	Konvergenzzone	29
29.07.06	Weiter Konvergenzzone über D, andauernde starke Schauer und Gewitter im W, später auch östlich der Elbe	Konvergenzzone	20
22.05.07	Warmfront über der Mitte Ds, ergiebige Schauer im S/SW und Brandenburg	Warmfront	9
23.05.07	In subtropischer Warmluft, schwache Kaltfront, intensiver Regen, z.T. Gewitter südl. Berlin-Osnabrück	Schwache Kaltfront	6
24.05.07	Luftmassengrenze, im S z.T. Gewitter	Warmfront	9
25.05.07	Verlagerung Warmfront nach N, im W. Ds einzelne Gewitter, z.T. stark (HH und NS)	Warmfront	29
26.05.07	Luftmassengrenze (WF und KF) über Deutschland ergiebige Niederschlägen, z.T. unwetterartige Gewitter in nördl. SA	Warmfront	29
27.05.07	Kaltfront von S -N, KF im N, 2 Niederschlagsbereiche entlang des Rheins und der Oder	Kaltfront	29
09.06.07	WF und KF westlich des Rheins mit vereinzelt Schauern	Kaltfront/Warmfront	26
10.06.07	Tiefdruckrinne über Weserbergland, z.T. wolkenbruchartige Regenfälle in HE und BW	Konvergenzzone	36
11.06.07	Höhentief mit Konvergenzzone, Gewitter im SW Ds, auch in NRW	Konvergenzzone	6
12.06.07	Subtropische Luft im W und S, heftige Gewitter an Konvergenzzone	Konvergenzzone	9

Datum	Wetterlage	Klassifizierung	oWLK
13.06.07	Post Kaltfront, teils schwere Gewitter mit Starkregen (Alpen/Vorland, NS-MP)	Postfrontal (KF)	9
14.06.07	Zustrom milder, feuchter Luft aus SW, Schauer und Gewitter Rheinl., BW	Konvektive Ereignisse	29
15.06.07	Gewitter beihebungsvorgängen an KF in BB-BY, BW	Kaltfront	29
16.06.07	Luftmassengrenze mit Schauern/ Gewittern in BB u. Erzgebirge	Kaltfront / Konvektive Ereignisse (?)	19
17.06.07	Langsame Verlagerung Trog mit Schauern/Gewittern, mit ergiebigen Niederschlägen	Höhentrog (?)	39
20.07.07	Tief über D, heftige Gewitter ziehen ONO nach Franken	Kaltfront	29
21.07.07	Okklusion über N-D, Gewitter über Mittelgebirgen,	Okklusion	9
22.07.07	Tief mit WF zieht von den Alpen nach N/NO, in BY und TH gebietsweise Unwetter, weiter nach NO	Warmfront	19
23.07.07	Abziehendes Tief, Zwischenhoch	-	9
07.08.07	Konvergenzzone vor KF , heftige Gewitter über NRW, Dauerregen am Mittelrhein	Konvergenzzone	26
08.08.07	Konvergenzzone nach O gezogen, Gewitter in SA u. BB, an der KF in NS, BY, BW ergiebige Niederschläge	Konvergenzzone (im O) Kaltfront (im W)	38
09.08.07	Warmluft im O mit Sturzregen in Berlin, im W. Einfluss eines Höhentiefs mit Starkregen im W und Mittelgebirgen	Konvektive Ereignisse Höhentief	38
10.08.07	Warmfront zieht nach W, Gewitter in SA und MV	Warmfront	16
11.08.07	Stationäre Luftmassengrenze über D, viel Niederschlag in BY, BW, ergiebige Niederschläge im N: Lüb. Bucht u. NS	Okklusion (?)	16
21.08.07	Tief zieht von SO nach N, dann W, Starkregen mit Gewittern in BE/BB, S-A, NS, HE	Okklusion	36
22.08.07	Tief mit Starkregengebiet zieht von S-A nach W mit Niederschlag in NRW, Gewitterzelle über BE, BB	Okklusion	36
23.08.07	Gewitterzelle zieht N/NW mit Starkregen und Überflutungen in MV, SH, unter Einfluss eines Höhentiefs kräftige Gewittercluster in BW, BY, SA	Konvektive Ereignisse (im N) Höhentief (im S)	38
24.08.07	Unter Einfluss des Höhentiefs schwere Gewitter in BE, BB	Konvektive Ereignisse (Höhentief)	19
27.09.07	Aufgleiten vor Tief südlich der Alpen, ergiebige Niederschläge in BY	Warmfront (?) (Aufgleiten vor Tief)	38
28.09.07	Tief zieht nach N, großräumiges Regengebiet west. NRW (Überschwemmungen) bis TH, SA, später BB	Okklusion	36

Datum	Wetterlage	Klassifizierung	oWLK
29.09.07	Tief zieht langsam nach N, Regengebiet über südl. NS, S-A, SA, TH stationär Höhentief mit Gewittern über nördl. NRW	Okklusion Höhentief	34
30.09.07	Tiefzentrum über SH, andauernde Niederschläge in NS, HH	Okklusion/Höhentief	14
29.05.08	Südströmung mit feuchtwarmer Luft löst Gewitter mit Hagel in W-D aus, ebenso in N-Hessen und Schwarzwald	Warmfront (?)	28
30.05.08	Advektion feuchtwarmer Luft, Gewittercluster vor KF im W, Starkregenereignisse ziehen über Eifel, Niederrhein bis Nordsee	Warmfront und Okklusion	28
31.05.08	Weiter Luftmassengrenze von SO nach NW mit feuchtwarmer Luft im O, Schauer westl. der WF	Warmfront	26
03.06.08	Weiter fast stationäre Luftmassengrenze von SO nach NW, Gewitter vom Harz nach TH, Gewitter mit Unwettercharakter über NRW,RP,BW	Warmsektor Kaltfront	26
04.06.08	Luftmassengrenze mit Konvergenzzone von NW nach BB, dort unwetterartige Schwergewitter	Konvergenzzone	26
05.06.08	Höhentief südlich der Alpen lenkt feuchtilabile Luft nach W-D, Regenschauer von BY bis NRW	Okklusion	28
26.07.08	Subtropische Luft von SO nach D, Schauer und Gewitter in BB und SA, im W außerordentlich schwere Gewittern mit lokalen Überflutungen und Hagel (Dortmund)	Konvektive Ereignisse Konvergenzzone	28
27.07.08	Gewitterzellen an der Konvergenzzone BW, Süd-HE, NRW bis NS	Konvergenzzone	8
28.07.08	Gewittercluster von Frankreich nach W-D mit unwetterartigen Regenfällen im SL	Konvektive Ereignisse	26
01.08.08	Warmluftadvektion mit Gewittern in NS, TH, BY, SA	Konvektive Ereignisse	9
02.08.08	In der sehr warmen Luft höchste Niederschläge am Alpenrand	Konvektive Ereignisse	19
03.08.08	Umstellung Wetterlage auf W-Strömung, nur örtlich Schauer	Kaltfront	9

3.6.2 Ergebnisse

Die obige Tabelle 12 zeigt, dass die meisten Schadensfälle mit Starkregen in den Sommermonaten Juni, Juli und August auftreten, teilweise auch im Mai oder September. Der einzige Winterfall – 1. bis 4. Januar 2003 – ist nach Berichten der Berliner Wetterkarte mit Ausuferungen verbunden. Fast alle Starkregenereignisse sind mit Gewittern verbunden, was auf starke Hebungsvorgänge in der Atmosphäre hinweist.

Eine Zuordnung der Starkregenfälle zu Wetterlagen ist nicht immer einfach, da es sich teilweise um zwei Fronten über Deutschland handelt, die zu unterschiedlichen Tiefdrucksystemen gehören, teilweise um Konvergenzlinien oder Hochdrucklagen, die mit

einem Höhentief verbunden sind. Die Hebung und damit der Auslöser für sehr starken Niederschlag kann also durch unterschiedliche Ereignisse ausgelöst werden. Die Ereignisse mit Schadensfällen sind überwiegend kleinräumig und häufig mit Gewitter, teilweise mit Hagel verbunden. Im Zuge sehr langsam ziehender oder stationärer Systeme kommt es auch zu Dauerregen. Dieser ist eher mit einer Okklusion verbunden, die nicht so rasch weiter zieht wie Kalt- oder Warmfronten

Die Klassifizierung der Niederschlagsereignisse, die mit Schadensfällen zusammenhängen, ergibt folgendes Bild

Tabelle 13. Anzahl der Starkregenereignisse pro Wetterereignis

Kaltfront	21
Warmfront	15
Okklusion	15
Konvergenzzone	14
Höhentief	11
Konvektives Ereignis	16

Dabei sind Mehrfachnennungen möglich, da zwei verschiedene Wettersysteme über Deutschland wetterwirksam sein können, zwei Frontensysteme ineinander übergehen können (Kaltfront und Okklusion) und nicht eindeutig klassifizierbare Ereignisse (wie z.B. Okklusion/Höhentief) nicht wegfallen sollen. Frontale Strukturen (Kaltfront, Warmfront, Okklusion) überwiegen, zählt man auch noch die Konvergenzzonen dazu, so werden Starkregenereignisse zu 70 % durch Hebungsvorgänge an frontalen Strukturen ausgelöst. Kaltfronten mit ihrer starken Vertikalbewegung bilden die größte Klasse. Rein konvektive Ereignisse treten seltener auf. Meist sind Vorgänge in höheren Atmosphärenschichten, die Hebungsprozesse bedingen, beteiligt.

In Tabelle 12 sind auch die Wetterlagenklassen der objektiven Wetterlagenklassifikation des Deutschen Wetterdienstes eingetragen. Es kann eine Häufung von bestimmten Wetterlagen festgestellt werden, die sich von der Häufigkeit insgesamt abhebt. Dies sind die Wetterlagenklassen 9 und 29 mit je 16 und 15 Fällen von insgesamt 80. Aber auch die Klassen 26 (9 mal), 19 (7 mal) und 36 (6 mal) treten häufiger auf. Es handelt sich hier um Wetterlagen mit SW-Anströmung (9, 29, 19), was für Advektion feuchtwarmer Luft spricht, aber auch windschwache Lagen, die eher thermische Gewittertätigkeit bedeuten können (26, 36).

Ähnliche Ergebnisse wurden auch für Nordrhein-Westfalen ermittelt (hydro & meteo, 2010). Hier wurden für Niederschlagsdaten in den Zeiträumen 1979 – 2009 bzw. 2002 – 2009 die Häufigkeiten der oWLK für Daten ermittelt, die einen bestimmten Schwellenwert überschreiten. Es zeigte sich eine Präferenz bestimmter Wetterlagen, insbesondere für Werte > 20 mm, die auch für die obigen Fälle festgestellt wurde. In einer weiteren Studie (Lang, 2010) für Nordrhein-Westfalen konnten die umfangreichen Datensätze aus der URBAS-Datenbank, SYNOP-Daten des Deutschen Wetterdienstes und zusätzlich 107 Stationen aus NRW für 1980 bis 2008 genutzt werden. Für konvektive Ereignisse, die unterschiedlich definiert wurden, zeigten sich übereinstimmend im Sommerhalbjahr größere Häufigkeiten der Wetterlagen 9, 29 und 39.

Zwei wichtige Anmerkungen können den meteorologischen Berichten der Berliner Wetterkarte entnommen werden. Eine nicht seltene Bemerkung betrifft die Aussagekraft von Stationsmeldungen. Da für die Wetteranalyse in der Berliner Wetterkarte auch die Radarbilder herangezogen werden, kann ein teils gravierender Unterschied zwischen den Niederschlagsmengen des Stationsnetzes und des Radarnetzes festgestellt werden. Es sei hier nur ein Zitat für den 20.7.2007 genannt: „Das relativ dünne Netz der synoptischen

Stationen lieferte hierzu im Gegensatz zur flächigen Darstellung des Wetterradars nur wenige Anhaltspunkte. Lediglich die Station in Roth südlich Nürnbergs meldete aus dem Zeitraum von 12 bis 18 UTC eine Regenhöhe von 25 mm und eine Windbö von 20 m/s (8 Beaufort). Dieser Umstand illustriert wie wichtig eigentlich eine gründliche Analyse der Radardaten ist. Leider werden auf diesem Gebiet in letzter Zeit viel zu geringe Anstrengungen unternommen.“ (Berliner Wetterkarte, 2007).

Eine weitere Anmerkung in der Berliner Wetterkarte (2006) zielt auf die Güte von Modellvorhersagen ab: „Die numerischen Vorhersagen liefern bei der Simulation des Niederschlags zwar scheinbar konkrete Werte, die, wie die Praxis zeigt, bei konvektivem Niederschlag selten zutreffend und manchmal auch völlig irreführend sind.“ Dieses Zitat zeigt, dass die Modellsimulation von Starkregen, der ja in den meisten Fällen konvektiver Natur ist, nicht immer mit Beobachtungen übereinstimmt und u.U. zusätzliche Kriterien etwa zur Projektion von Modellsimulationen herangezogen werden müssen.

3.6.3 Wetterlagenklassen und Schadenhäufigkeiten

Um zu überprüfen, inwieweit der Zusammenhang zwischen Starkniederschlagsereignissen und Wetterlagen Potential hat, zur Schärfung der Definition einer Schadensfunktion beizutragen, wurde den täglichen Schadensdaten (inklusive der Tage mit Null Schaden) jeweils die zugehörige Wetterlagenklasse der objektiven Wetterlagenklassifikation des Deutschen Wetterdienstes zugeordnet. Die folgende Abbildung 19 zeigt eine Verteilung der Wetterlagenklassen für den Gesamtzeitraum von 2004 bis 2009 für die Kreise in Bayern, die mindestens eine Niederschlagsmessstation beinhalten. Wie aus Abbildung 19 zu sehen ist, sind die Wetterlagenklassen 9, 15, 29, 10, 5, 1, 39 und 14 die am häufigsten eintretenden Wetterlagen.

Aus der Analyse der Wetterlagen zum Zeitpunkt von Starkregenereignissen, ergab sich, dass diese bevorzugt mit den Wetterlagenklassen 9, 29, 26, 19, 36 und 28 zusammenfallen (siehe Tabelle 14). Es ist also anzunehmen, dass es bestimmte Wetterlagenklassen gibt, die bei Starkregenereignissen überrepräsentiert (26, 19, 36, 28) sind, während andere häufig auftretende Wetterlagenklassen nicht oder nur selten im Zusammenhang mit Starkregenereignissen auftreten (15, 10, 5, 1, 39, 14, dabei handelt es sich aber bei den Wetterlagenklassen 15, 5, 1 und 14 um als „trocken“ gekennzeichnete Wetterlagen, nur die Wetterlagen 10 und 39 sind „feuchte“ Wetterlagen mit Starkniederschlagspotential).

Die zentrale Frage für die folgende Untersuchung ist also: **Kann man mit Hilfe der Schadensdaten bestimmte Wetterlagen identifizieren, die bezogen auf ihre Gesamthäufigkeit überproportional oft dann auftreten, wenn Gebäudeschäden durch Starkregen aufgetreten sind?**

Tabelle 14. Prozentualer Anteil ausgewählter Wetterlagenklassen bei Starkregenereignissen

Wetterlagenklasse	Prozentualer Anteil an den GDV Ereignissen
29	17,2 %
9	18,4 %
26	10,3 %
19	8,0 %
36,28	6,9 %

Verteilung der Wetterlagen nach DWD Klassifikation 2004 bis 2009

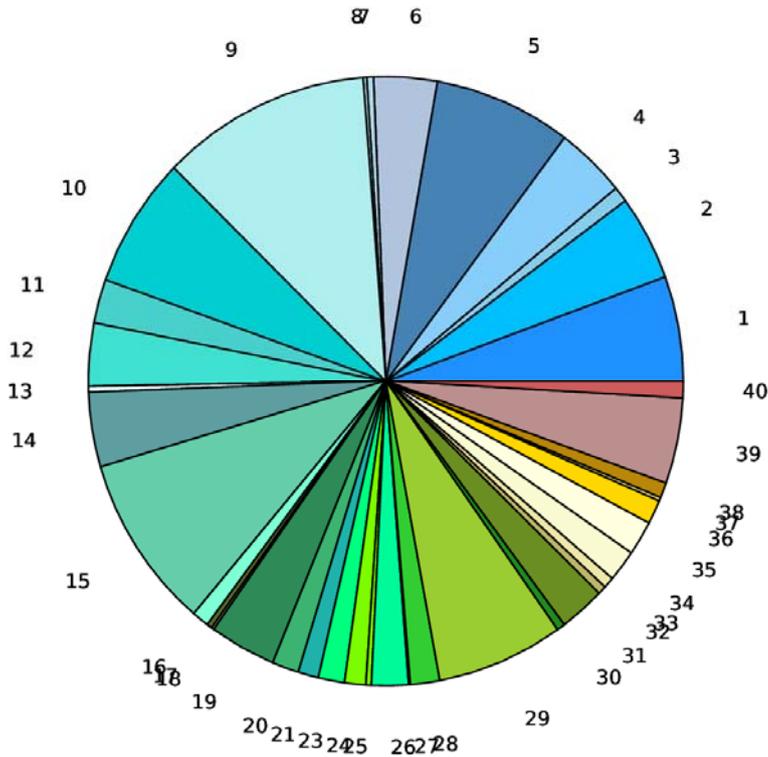


Abbildung 19: Verteilung der Wetterlagen nach DWD oWLK Klassifikation 2004 bis 2009.

Für die folgenden beiden Abbildungen 20 und 21 wurden diese Daten gefiltert, so dass nur die Tage und Kreise in die Analyse eingehen, an und in denen eine relative Schadenhäufigkeit von > 0.5 % (links) und > 1.5 % (rechts) gemeldet wurde.

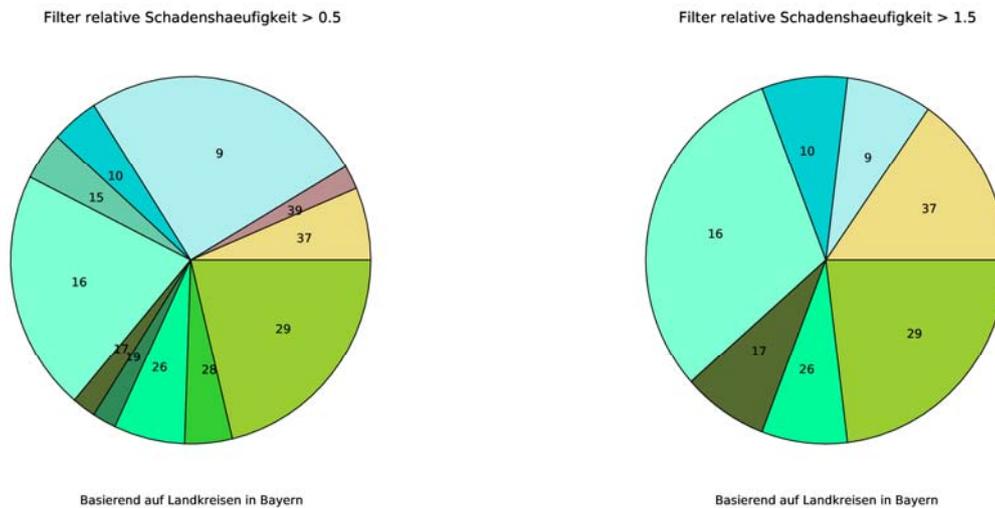


Abbildung 20: Verteilung der Wetterlagen nach DWD Klassifikation 2004 bis 2009 für Kreise in Bayern. Gefiltert nach Tagen und Kreisen in denen Schäden mit einer Schadenhäufigkeit von > 0.5 % (links) und > 1.5 % (rechts) auftraten.

Wie deutlich zu sehen ist, reduziert sich im Falle der gefilterten Schäden die Anzahl der vorkommenden Wetterlagen. Vorherrschend für mittlere Schadensereignisse (Abbildung 20, links) sind die Wetterlagen 9, 16 und 29 die, wie aus Tabelle 11 ersichtlich, alle den feuchten Wetterlagen zuzuordnen sind. Wetterlagen 9 und 29 beschreiben außerdem übereinstimmend Süd-Westliche Anströmrichtungen.

Bei den starken Schadensereignissen (Abbildung 20, rechts) reduziert sich der Beitrag von Wetterlage 9 zugunsten der Wetterlagen 37 (Nord-West Anströmung), 16 (unklare Anströmrichtung) und 17 (Nord-Ost Anströmung). Diese 3, bei starken Schadensereignissen (relativ) häufig vorliegenden Wetterlagen haben eine zyklonale Strömung im 500hPa Niveau, d.h. den Einfluss eines Höhentiefs gemeinsam.

Besonders interessant sind hier nicht die Wetterlagen 9 und 29, bei denen man aufgrund ihres generellen häufigen Auftretens nicht sicher von einer Überrepräsentation sprechen kann. Die Wetterlagen 16, 17 und 37, die generell einen eher kleinen Anteil an der Gesamthäufigkeitsverteilung haben scheinen jedoch deutlich mit Starkregenereignissen in Bayern verknüpft zu sein.

Eine identische Auswertung, aber beschränkt auf die sich im Voralpenland befindenden Kreise ist in den folgenden Abbildungen dargestellt. Auf die Abbildung ohne Filterung wird hier verzichtet, da eine Wetterlagenklasse immer ganz Deutschland repräsentiert, und die Abbildung daher identisch zu der Bayernweiten Abbildung wäre.

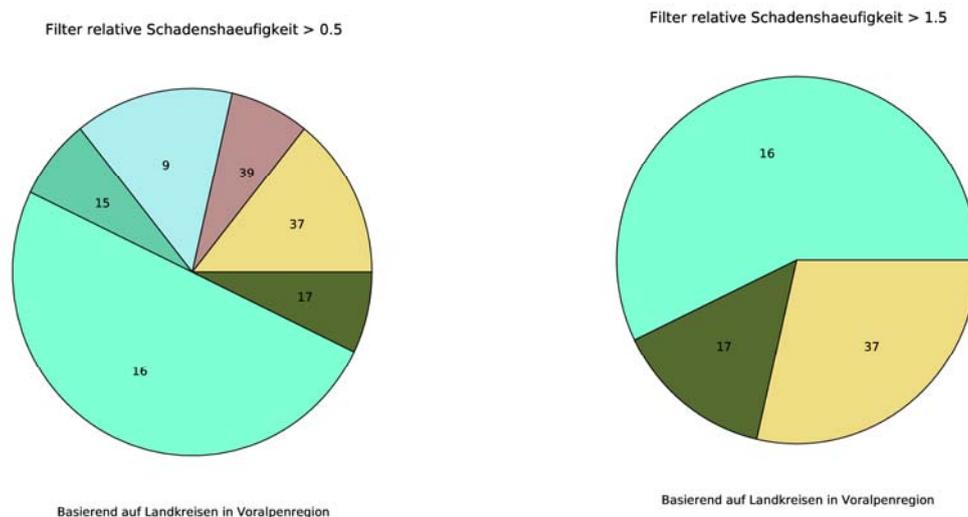


Abbildung 21: Verteilung der Wetterlagen nach DWD Klassifikation 2004 bis 2009 für Kreise im Voralpenland. Gefiltert nach Tagen und Kreisen in denen Schäden mit einer Schadenhäufigkeit von > 0.5 % (links) und > 1.5 % (rechts) auftraten.

Für die nach Schäden gefilterte Analyse im Voralpenland ergibt sich ein ähnliches Bild, vorherrschende Wetterlagen für starke Schadensereignisse sind die Wetterlagenklassen 16, 17 und 37. Aufgrund der geringen Datenmenge bei den starken Schadensereignissen in Bayern ist diese Auswertung aber noch mit großen Unsicherheiten verbunden.

Fazit des wetterlagenbezogenen Ansatzes

Die meteorologische Klassifizierung der Tage mit hohen Niederschlägen und gemeldeten Schäden zeigt die Dominanz frontaler Systeme. Atmosphärische Fronten können die für starke und extreme Niederschlagsentwicklung notwendigen Hebungsvorgänge initiieren. Rein vom überhitzten Boden können offenbar keine

extremen Schauer und Gewitter ausgelöst werden, auch wenn die Schichtung der bodennahen Grenzschicht eine große Rolle spielen kann. Die mittlere, teilweise auch die höhere Atmosphäre muss die entsprechende Konvergenz, Vertikalbewegung und Luftmassenadvektion bewerkstelligen. Dies wird durch die häufige Klassifizierung konvektiver Ereignisse in Zusammenhang mit Konvergenzlinien, Höhentiefs oder Trögen deutlich.

Die objektive Wetterlagenklassifikation beschreibt offenbar diesen Zusammenhang richtig, da sich eine Häufung bestimmter Wetterlagen zeigt.

Ein solcher Zusammenhang lässt sich auch unabhängig vom gemessenen oder modellierten Niederschlag aus täglichen Schadensdaten und täglichen Wetterlagenklassifikationen ableiten. Dabei sind wie am Beispiel des Voralpenlandes gezeigt, die dominierenden Schadens-Wetterlagen regionsspezifisch.

Ein solches Klassifizierungsschema bietet also auch die Möglichkeit, Klimaprojektionen bezüglich möglicher zukünftiger Trends zu analysieren.

4 Starkregenänderungskarte für Deutschland auf Kreisebene

Da die vorliegende Studie noch nicht die Verbindung der Schäden mit den projizierten Klimaänderungen quantitativ untersucht, wird hier **als Beispiel für ein Starkregenmaß eine Überschreitung der Tagesniederschlagssumme von 25mm** herangezogen. Sobald aus weiteren Untersuchungen das tatsächliche schadensrelevante Starkregenereignis identifiziert ist, kann dieses entsprechend ausgewertet und visualisiert werden (siehe Ausblick, Kapitel 6). Eine Überprüfung der Simulationsqualität der Klimamodelle in Bezug auf dieses schadensrelevante Starkregenmaß ist dann auch durchzuführen.

Die Starkregenänderungskarte auf Kreisebene basiert auf dem zurzeit verfügbaren Ensemble aus *state-of-the-art* Klimaänderungssimulationen für Deutschland (siehe Tabelle 15). Dieses besteht aus den Simulationen des ENSEMBLES-Projekts (<http://www.ensembles-eu.org/>) und wurde ergänzt durch die sogenannten Konsortialrechnungen, durchgeführt mit dem regionalen Klimamodell CLM und durch verschiedene mit dem regionalen Klimamodell REMO in unterschiedlichen Projekten durchgeführten Simulationen (siehe „Regionale Klimaprojektionen für Europa und Deutschland“, CSC Report Nr. 6¹).

Tabelle 15. Liste der verwendeten Simulationen

Institution	Regionalmodell	Globalmodell	SRES Szenario	Referenz Regionalmodell	Quelle
SMHI	RCA3.0	HadCM3Q3	A1B	Kjellstroem et al (2005)	ENSEMBLES Datenbank
SMHI	RCA3.0	ECHAM5/MPI-OM	A1B	Kjellstroem et al (2005)	ENSEMBLES Datenbank
MPI-HH	REMO	ECHAM5/MPI-OM	A1B	Jacob, D., (2001)	ENSEMBLES Datenbank
HC	HadRM3Q0	HadCM3Q0	A1B	Collins et al (2006)	ENSEMBLES Datenbank
HC	HadRM3Q3	HadCM3Q3	A1B	Collins et al	ENSEMBLES

¹ Verfügbar auf der Webseite des Climate Service Centers: <http://www.climate-service-center.de/>

				(2006)	Datenbank
HC	HadRM3Q16	HadCM3Q16	A1B	Collins et al (2006)	ENSEMBLES Datenbank
KNMI	RACMO2	ECHAM5/MPI-OM	A1B	Meijgaard et al (2008)	ENSEMBLES Datenbank
ICTP	REGCM3	ECHAM5/MPI-OM	A1B		ENSEMBLES Datenbank
ETHZ	CLM	HadCM3Q0	A1B	Böhm et al (2006)	ENSEMBLES Datenbank
DMI	HIRHAM5	BCM	A1B		ENSEMBLES Datenbank
DMI	HIRHAM5	ECHAM5/MPIOM	A1B		ENSEMBLES Datenbank
DMI	HIRHAM5	ARPEGE	A1B		ENSEMBLES Datenbank
CNRM	RM5.1	ARPEGE	A1B		ENSEMBLES Datenbank
C4I	RCA3	HadCM3-e1	A1B	Kjellstroem et al (2005)	ENSEMBLES Datenbank
CLM-Community, M&D, MPI-HH	CLM	ECHAM5/MPIOM	B1_1, B1_2, A1B_1, A1B_2	M&D (2008)	World Data Center for Climate, Hamburg
MPI-HH	REMO	ECHAM5/MPIOM	A1B_1, B1_1, A2_1	Jacob, et al (2008)	World Data Center for Climate, Hamburg
MPI-HH	REMO	ECHAM5/MPIOM	A1B_2, A1B_2, A1B_3, A2_2, A2_3, B1_2, B1_3		Jacob et al (2005 bis 2011): REMO Gruppe, MPI-HH, CSC

Der Schwerpunkt der Starkregenänderungskarte liegt nicht in der genauen Quantifizierung der zukünftigen Änderungen, sondern auf einer Beurteilung der Robustheit der projizierten Änderungen. Sie sollen die Regionen aufzeigen, in denen ein Eintreffen von Starkregenänderungen als sehr wahrscheinlich angesehen werden kann. Dafür werden die Daten einem dreistufigen Robustheitstest unterzogen, welches in den folgenden Unterkapiteln erläutert wird.

Die Methode zur Erstellung der Starkregenänderungskarte erlaubt eine fortlaufende Weiterentwicklung. Insbesondere kann ihre Datenbasis sukzessive durch neue Klimaänderungssimulationen ergänzt werden. Auch die durchgeführten Robustheitstests lassen sich aufgrund der modularen Programmierung leicht abändern bzw. ergänzen. Gleiches gilt für Schwellenwerte und Robustheits-Maßzahlen.

Für die Starkregenänderungskarte, die einen Zeithorizont von 2050 hat, wurden alle Klimaänderungssimulationen in ein Ensemble zusammengefasst, obgleich den Simulationen zum Teil unterschiedliche Emissionsszenarien zugrunde liegen. Dies ist nur dann möglich, wenn der Zeithorizont auf die Mitte des aktuellen Jahrhunderts begrenzt ist. Bis zu diesem Zeitpunkt unterscheiden sich die IPCC AR4 SRES Szenarien (Nakicenovic

2000) in ihren Treibhausgaskonzentrationen noch nicht stark voneinander (in Abbildung 22 exemplarisch für das Treibhausgas CO₂ gezeigt). Bei einer Betrachtung der ferneren Zukunft sollte eine Separation der Simulationen anhand der unterschiedlichen Emissionsszenarien bedacht werden. Das hier verwendete Simulationsensemble hat durch die Einbindung der ENSEMBLES Modellsimulationen einen Schwerpunkt auf dem A1B Emissionsszenario.

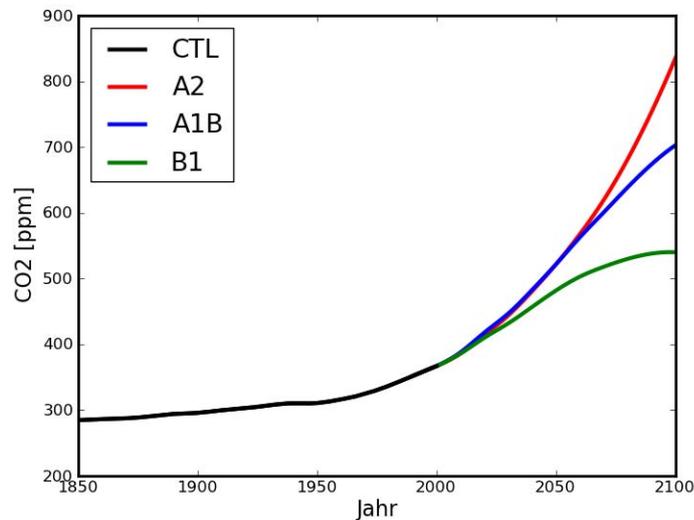


Abbildung 22. Entwicklung der globalen atmosphärischen CO₂ Konzentrationen unter den SRES Szenarien A2, A1B und B1 (Nakicenovic 2000), die im 4. Sachstandsbericht des IPCC verwendet wurden.

Da die unterschiedlichen Modellergebnisse nicht alle auf demselben räumlichen Bezugsgitter zur Verfügung stehen, wurden sie im ersten Schritt mittels bilinearer Interpolation auf ein einheitliches Gitter gebracht. Es wurde das am größten aufgelöste beteiligte Gitter verwendet, welches das gemeinsame Gitter der ENSEMBLES Simulationen mit einer Gitterauflösung von ca. 25km x 25km ist. Dadurch gehen Details der Simulationen auf höher aufgelösten Gittern verloren (CLM ca. 18km x 18km, REMO ca. 10km x 10km). Störungen bzw. Fehlinterpretationen der Ergebnisse durch unterschiedliche Auflösung werden jedoch reduziert.

Auf diesem gemeinsamen Gitter wurde nun auf Basis von täglichen Niederschlagssummen für jedes Modell und für jede Gitterbox für den Zeitraum von 1961 bis 2070 die Anzahl der Tage mit einer Niederschlagssumme von > 25 mm gezählt und für jedes Jahr aufsummiert. Klimatologische Mittel der Jahressummen wurden für den Referenzzeitraum (1966 bis 1995) und für den Zeitraum des zukünftigen Klimas (Szenarienzeitraum: 2036 bis 2065) berechnet. Die Differenz zwischen Referenzzeitraum und Szenarienzeitraum definiert das Klimaänderungssignal und ist in den Karten als prozentuale Änderung dargestellt.

Da die Starkregenänderungskarte Teil der Machbarkeitsstudie „Starkregen 2050“ ist, die Schaden und Starkregen auf Kreisebene verknüpft, wurden die Gitterboxen, die zu mindestens 50% innerhalb eines Kreises liegen, für den jeweiligen Kreis zusammengefasst und deren Werte räumlich gemittelt. Im Folgenden werden die hier betrachteten modellierten Starkniederschläge vereinfachend auch als Starkregen bezeichnet.

Aus der somit für jede Modellsimulation vorliegenden berechneten zukünftigen Änderung der Starkregentage wird für jeden Kreis der Median der Änderungen (d.h. 50 % der Änderungen liegen darüber und 50 % darunter) berechnet und in einer ersten Karte graphisch als prozentuale Zunahme dargestellt (Abbildung 23). Kreise, in denen der Starkregen nicht zunimmt, werden, falls sie auftreten, nicht berücksichtigt und als graue Fläche markiert. Die Farben in Abbildung 23 zeigen Regionen mit kleinen positiven

Änderungen (grün), mittleren positiven Änderungen (orange) und starken positiven Änderungen (rot). Als Schwellenwerte wurden zwischen +0 % und +10 % für kleine, zwischen +10 % und +15 % für mittlere, sowie >+15 % für starke Änderungen gewählt.

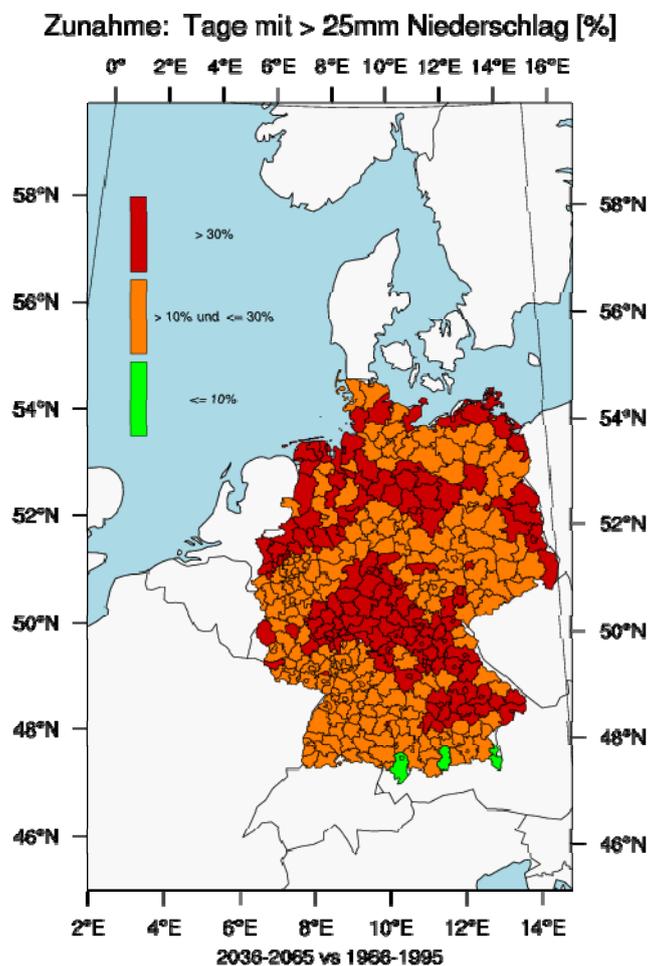


Abbildung 23. Zunahme der Anzahl der Tage mit Starkregen (>25 mm/Tag) für den Zeitraum 2036 bis 2065 verglichen mit dem Referenzzeitraum von 1966 bis 1995 [%]. Median aus einem Ensemble von 28 regionalen Klimaänderungssimulationen.

Um die Zuverlässigkeit dieser Projektion besser einschätzen zu können, wurde ein dreistufiges Verfahren (Agreement, Signifikanz, Sensitivität) zur Überprüfung der Robustheit durchgeführt.

4.1 Übereinstimmung

Als erstes Maß der Robustheit dient die Übereinstimmung der Modellergebnisse in der Richtung der simulierten Änderungen. Dies wird im Folgenden mit *Agreement* bezeichnet. In Anlehnung an die im 4. IPCC Sachstandsbericht verwendete Methode wird abgefragt, wie viele der Ergebnisse der (hier 28) Simulationen dieselbe Richtung des Änderungssignals zeigen, in diesem Fall also eine Zunahme der Starkregentage. Die Strenge dieses Kriteriums kann über den Prozentsatz gewählt werden, der Voraussetzung für das Bestehen des Tests ist. Stimmen die Ergebnisse von mehr als 66 % der betrachteten Simulationen in der Richtung der Änderungen überein, gilt diese nach IPCC als „wahrscheinlich“. Einen strengeren Test stellt die Abfrage auf 90% Agreement dar, die nach IPCC „sehr wahrscheinliche“ Änderungen identifiziert. Standard für die Starkregenänderungskarten ist die Abfrage auf 66 % Übereinstimmung.

Abbildung 24 zeigt den Effekt des Agreement-Tests auf die Starkregenänderungskarten. Bei einer geforderten Übereinstimmung von 66 % sind alle Regionen robust in Bezug auf das Agreement-Kriterium.

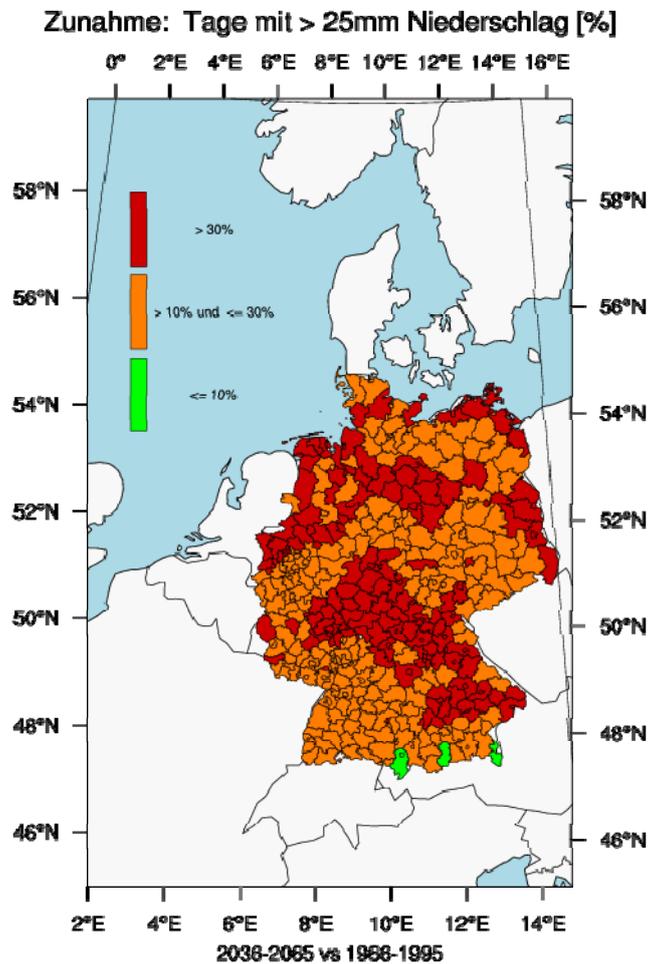


Abbildung 24. Zunahme der Anzahl der Tage mit Starkregen (>25 mm/Tag) für den Zeitraum 2036 bis 2065 verglichen mit dem Referenzzeitraum von 1966 bis 1995 [%]. Median aus einem Ensemble von 28 regionalen Klimaänderungssimulationen. Gäbe es Regionen, die nicht robust gegenüber dem *Agreement* - Kriterium von 66 % sind, so wären sie gestrichelt eingezeichnet.

4.2 Signifikanz

Zweites Maß der Robustheit ist die statistische Signifikanz der von den Modellen berechneten Klimaänderungen. Diese wird für jede Simulation separat berechnet. Wir verwenden hierfür den U-Test oder Mann-Whitney-Wilcoxon Test (Wilcoxon 1945, Mann & Whitney 1947, Pettitt 1985), um die Nullhypothese zu untersuchen, dass sich für eine Klimavariablen (hier die Anzahl der Tage mit Niederschlag > 25 mm) die Verteilung für die Zukunft von der Verteilung für die Vergangenheit unterscheidet, also ob es ein (signifikantes) Klimaänderungssignal gibt. Die Idee des Tests ist folgende: man vereint die Stichproben aus Zukunft und Vergangenheit und untersucht, ob die möglichen Anordnungen der Ränge der Daten aus einer Stichprobe (z.B. Zukunft) gleich wahrscheinlich sind (d.h.: keine Klimaänderung), oder ob etwa die Ränge hin zu höheren Werten verschoben sind (d.h.: positive Klimaänderung). Im Fall der Starkregenänderungsdaten stellen die 30 Jahre der

Referenzperiode sowie der Klimaänderungsperiode jeweils eine Stichprobe der Mann-Whitney-Wilcoxon Statistik dar. Der Test ist besonders geeignet aus zwei Gründen:

(1) Durch die Verwendung der Ränge erzielt der Test Robustheit gegenüber möglichen Verteilungsformen; er ist z.B. auch anwendbar für rechtsschiefe Verteilungen (Niederschlag).

(2) Er ist intuitiv verständlich, weit verbreitet und seit langem in Gebrauch in vielen Wissenschaftsdisziplinen.

Eine Grundannahme des U-Tests ist die Unabhängigkeit der Daten einer Stichprobe. Es wurde deshalb mit Hilfe eines stochastischen Persistenzmodells (AR1) überprüft, ob die für die Starkregenänderungskarten verwendeten Daten dieser Grundannahme genügen (Mudelsee 2010). Das Ergebnis zeigte nur geringe Abhängigkeit (Autokorrelation) der Daten und somit keine Notwendigkeit der Anpassung der Methode.

Der U-Test wurde für jede Simulation separat mit einem Konfidenzniveau von 90 % ausgeführt. Um zu einer Aussage für das gesamte Ensemble zu gelangen, wurde wieder gefordert, dass mindestens 66 % der Simulationen den Signifikanztest bestehen müssen. Regionen, in denen dies nicht der Fall war, wurden „gekennzeichnet“ markiert, wie in Abbildung 25 zu sehen ist.

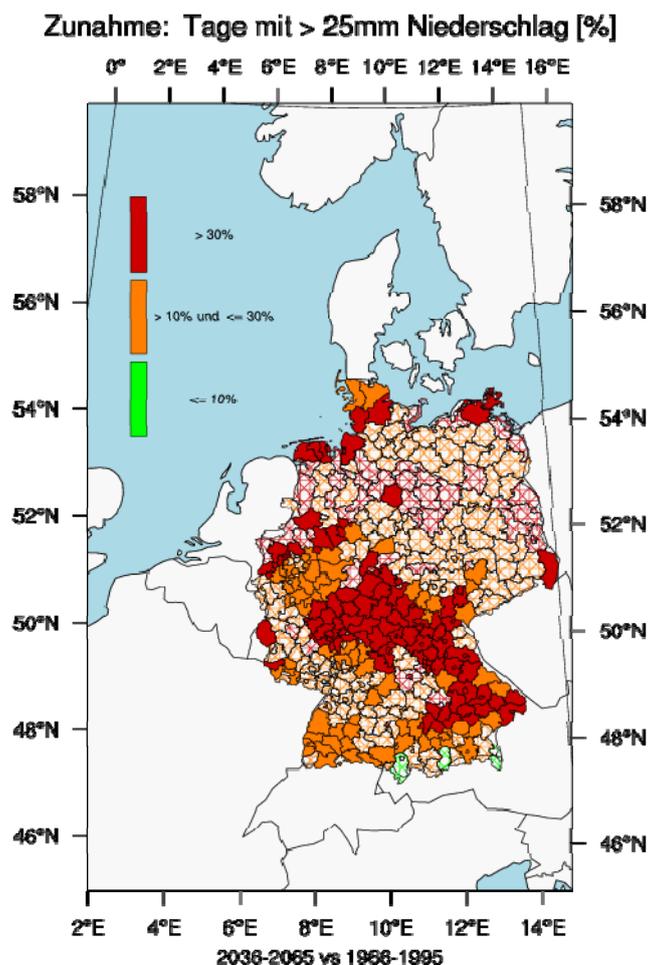


Abbildung 25. Zunahme der Anzahl der Tage mit Starkregen (>25 mm/Tag) für den Zeitraum 2036 bis 2065 verglichen mit dem Referenzzeitraum von 1966 bis 1995 [%]. Median aus einem Ensemble von 28 regionalen Klimaänderungssimulationen. In „gekennzeichneten“ Regionen zeigen weniger als 66 % der Simulationen signifikante Änderungen in der Anzahl der Starkregentage.

4.3 Sensitivität gegenüber kleinen zeitlichen Verschiebungen

Der dritte Test wurde eingeführt, um sicher zu stellen, dass die Ergebnisse nicht stark abweichen bei einer kleinen Verschiebung der Referenzperiode bzw. der Klimaänderungsperiode. Die Idee ist, dass ein Klimaänderungssignal nicht mehr als robust anzusehen ist, wenn etwa sehr große Unterschiede zwischen (1) dem Klimaänderungssignal für die Zeiträume 2041 bis 2070 vs 1971 bis 2000 und (2) dem für die Zeiträume 2031 bis 2060 vs 1961 bis 1990 auftreten. Sollten die Unterschiede sehr groß sein, deutete dies entweder auf eine starke zeitliche Heterogenität der Daten, die eventuell einen längeren Zeitraum als 30 Jahre notwendig machen würden, um auf ein repräsentatives Klimamittel für Vergangenheit und Zukunft zu schließen. Alternativ könnte es auch bedeuten, dass die Entwicklung der Änderungen des Klimaparameters mit der Zeit stark nichtlinear ist. In diesem Fall ist es besonders wichtig, sich bewusst und zielorientiert mit der Auswahl von Referenz- und Klimaänderungsperiode auseinander zu setzen. Was hierbei unter „sehr großen Unterschieden“ bzw. „starken Abweichungen“ zu verstehen ist, ist abhängig vom betrachteten Parameter und von der Anwendung.

Praktisch wurde der Test wie folgt durchgeführt: Um die ausgewählten Zeitperioden wurde jeweils ein Zeitraum von +/- 5 Jahren als Testzeitraum gewählt. Im Fall der vorliegenden Karte ist dies der Zeitraum von 1961 bis 2000 für das Referenzklima und der Zeitraum von 2031 bis 2070 für das zukünftige Klima. Durch Verschieben der 30-Jahres Periode um jeweils 1 Jahr wurden nun für Referenz und Szenario jeweils 11 Klimaperioden bestimmt und Klimaänderungssignale durch Differenzenbildung zwischen den Mittelwerten der je 70 Jahre auseinander liegenden Zeiträume berechnet:

Klimaänderungssignal 1: Mittelwert (2031 – 2060) verglichen mit Mittelwert (1961 – 1990)
Klimaänderungssignal 2: Mittelwert (2032 – 2061) verglichen mit Mittelwert (1962 – 1991)
Klimaänderungssignal 3: Mittelwert (2033 – 2062) verglichen mit Mittelwert (1963 – 1992)
Klimaänderungssignal 4: Mittelwert (2034 – 2063) verglichen mit Mittelwert (1964 – 1993)
Klimaänderungssignal 5: Mittelwert (2035 – 2064) verglichen mit Mittelwert (1965 – 1994)
Klimaänderungssignal 6: Mittelwert (2036 – 2065) verglichen mit Mittelwert (1966 – 1995)
Klimaänderungssignal 7: Mittelwert (2037 – 2066) verglichen mit Mittelwert (1967 – 1996)
Klimaänderungssignal 8: Mittelwert (2038 – 2067) verglichen mit Mittelwert (1968 – 1997)
Klimaänderungssignal 9: Mittelwert (2039 – 2068) verglichen mit Mittelwert (1969 – 1998)
Klimaänderungssignal 10: Mittelwert (2040 – 2069) verglichen mit Mittelwert (1970 – 1999)
Klimaänderungssignal 11: Mittelwert (2041 – 2070) verglichen mit Mittelwert (1971 – 2000)

Aus diesen 11 Klimaänderungssignalen wird eine Streuung (Median absoluter Abweichung als robuste Schätzung der Standardabweichung) berechnet, die per Test-Definition nicht größer sein darf als 25 % des berechneten Klimaänderungssignals der mittleren Periode (Klimaänderungssignal 6).

Dies wird für jede Simulation separat durchgeführt. Um zu einer Aussage über das Gesamtensemble zu gelangen wird wiederum verlangt, dass mindestens 66% der Simulationen diesem Robustheitskriterium entsprechen.

Regionen, in denen dies nicht der Fall war, wurden gepunktet markiert, wie in Abbildung 26 zu sehen ist. Starkregentage sind im Modell sehr selten vorkommende Extremereignisse, die daher zeitlich sehr heterogen verteilt sein können. Daher erklärt sich, dass durch die Methode der Zeitverschiebungen hier einige Regionen als nicht-robust markiert werden. Insbesondere Regionen im östlichen Teil Deutschlands sind vergleichsweise selten von Extremniederschlagsereignissen betroffen, so dass hier die Robustheit gegenüber der zeitlichen Verschiebung gering ist.

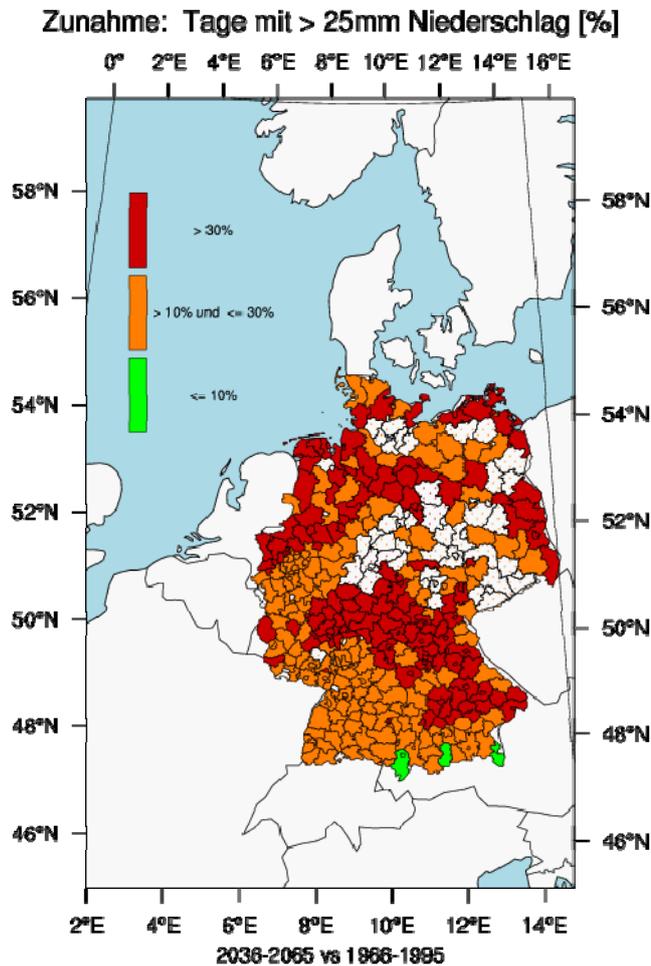


Abbildung 19. Zunahme der Anzahl der Tage mit Starkregen (>25 mm/Tag) für den Zeitraum 2036 bis 2065 verglichen mit dem Referenzzeitraum von 1966 bis 1995 [%]. Median aus einem Ensemble von 28 regionalen Klimaänderungssimulationen. In gepunkteten Regionen sind weniger als 66% der Simulationen robust gegenüber leichten Verschiebungen der Zeiträume.

4.4 Aggregierte Darstellung

Nicht für alle Anwendungen ist es sinnvoll und nötig, die einzelnen Beiträge der verschiedenen Robustheits-Kriterien separat darzustellen. Um einen schnellen Überblick über die als robust identifizierten Regionen zu bekommen wurde eine weitere Karte erstellt, in der die Beiträge der 3 Robustheitstest aggregiert dargestellt werden. Dabei werden nur die Regionen farbig markiert, die alle 3 Robustheits-Kriterien erfüllen. Regionen, die durch mindestens einen Robustheitstest fallen, werden grau markiert. Im Falle der Starkregenänderungskarte sieht man, dass sich die Regionen, die den Test der zeitlichen Verschiebung nicht bestanden haben, weitgehend mit denen nicht signifikanter Änderungen überdecken, so dass die aggregierte Karte quasi die Ergebnisse des Signifikanztests widerspiegelt (Abbildung 27).

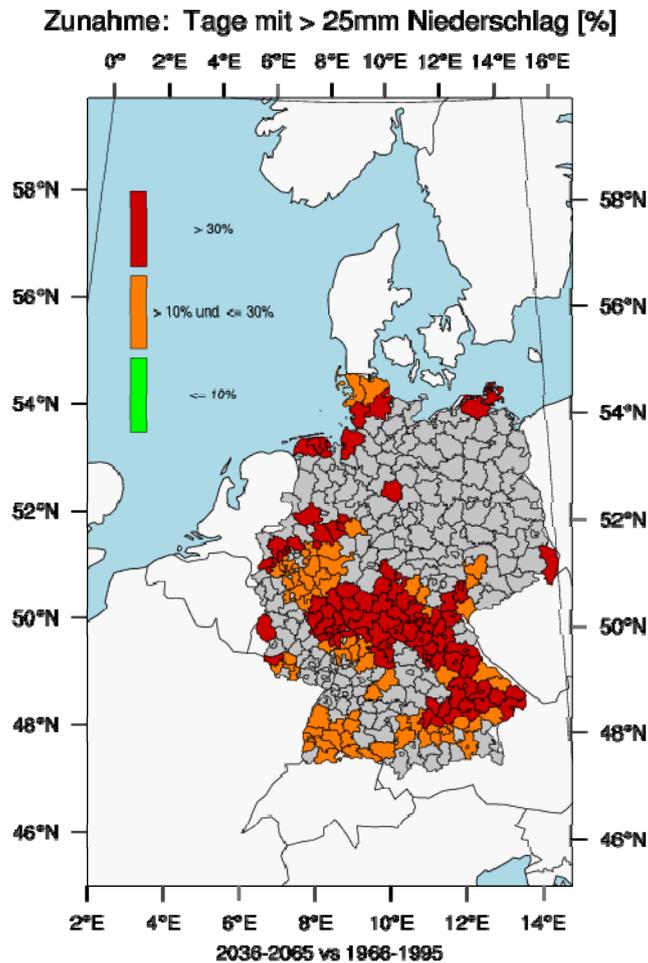


Abbildung 27. Zunahme der Anzahl der Tage mit Starkregen (>25 mm/Tag) für den Zeitraum 2036 bis 2065 verglichen mit dem Referenzzeitraum von 1966 bis 1995 [%]. Median aus einem Ensemble von 28 regionalen Klimaänderungssimulationen. Grau markierte Regionen weisen nach mindestens einem Test-Kriterium keine robusten Änderungen in der Anzahl der Tage mit mehr als 25 mm Niederschlag auf.

Fazit der Starkregenänderungskarten

Für den Zeitraum um 2050 ergibt sich aus einem Ensemble regionaler Klimaänderungssimulationen eine Zunahme der Anzahl der Tage mit Niederschlag >25 mm/Tag. In großen Teilen Deutschlands beträgt diese Zunahme mehr als 30 %. Als robust stellt sich diese Aussage in den Küstengebieten entlang der Nordsee, sowie in vielen Gebieten der deutschen Mittelgebirge heraus.

5 Lessons Learned der Machbarkeitsstudie

Die meisten Starkregenereignisse treten momentan im Sommer auf. Für sommerliche Starkniederschläge wurde aus wissenschaftlichen Publikationen sowie aus einem Review relevanter Forschungsprojekte kein einheitlicher Trend in den vergangenen Dekaden ermittelt. Tendenziell kam es aber eher zu einer Abnahme der sommerlichen Starkregenereignisse.

Für die Zukunft ergibt sich basierend auf einem Ensemble von regionalen Klimaänderungssimulationen im Jahresmittel eine Zunahme der Anzahl der Tage mit Niederschlagssummen größer als 25mm. Als robust erweist sich diese Änderung in der Küstenregion nahe der Nordseeküste, sowie in vielen Regionen deutscher Mittelgebirge.

Die Auswertung der regionalen Klimaprojektionen zeigt, dass die Zunahme der Tage mit Starkregen pro Jahr dominiert ist durch eine Zunahme im Herbst (September, Oktober, November). Obgleich die Anzahl der modellierten Starkregentage im Herbst für die Zukunft immer noch deutlich unter dem zukünftigen Niveau der Starkregen-Sommertage liegt, projizieren die Modelle eine Steigerung der Herbsttage mit Starkregen bis fast auf das heutige Sommerniveau.

Die bereits beobachtete Zunahme extremer Niederschläge im Winter (siehe Literaturrecherche), sowie die auf Basis der Projektionen zunehmenden herbstlichen, Starkniederschläge könnten Hinweise sein auf eine jahreszeitliche Verschiebung bzw. Ausdehnung der Starkniederschlagsereignisse.

Für die Ermittlung einer Schadensfunktion für heutiges Klima stellte sich eine gute räumliche Übereinstimmung der erfassten Schäden und der gemessenen Niederschläge als Grundvoraussetzung heraus. Diese konnte nur durch Einbeziehung von Radar-Niederschlagsbeobachtungen und räumlich hochaufgelöster Betrachtung der Schadensmeldungen mindestens auf Postleitzahlenebene erreicht werden.

Mit Hilfe der Radarstudie konnte gezeigt werden, dass es (für die beiden Fallstudien) möglich ist, aus den Daten einen Schwellenwert des Niederschlags zu finden, der den Bereich ohne wesentliche Schäden von dem Bereich trennt, ab dem Schäden auftreten. Für die beiden Fallstudien liegt dieser Schwellenwert nahe an der Bemessungsgrenze wasserwirtschaftlicher Bauwerke.

Ein weiteres Ergebnis war, dass die Beziehung zwischen Schaden und Niederschlag oberhalb dieser Bemessungsgrenze nicht sehr gut bestimmt ist. Für die Absicherung dieser Beziehung sollten daher weitere Kriterien wie z.B. Topographie, Versiegelungsgrad des Bodens, Wetterlagen, etc. hinzugezogen werden.

Um den potentiellen Einfluss einiger dieser Kriterien auf die Beziehung zwischen Schaden und Niederschlag abzuschätzen, wurden wetterlagen- und regionsbezogene Analysen der Daten für Bayern durchgeführt.

Diese zeigen, dass eine Einbeziehung der Wetterlage, sowie eine räumliche Differenzierung das Potential haben, die Schadensfunktion zu verbessern.

6 Literatur

- Arbeitskreis KLIWA (Hrsg.), 2006: Langzeitverhalten der Starkniederschläge in Baden-Württemberg und Bayern. KLIWA-Projekt A 1.1.3 "Trenduntersuchungen extremer Niederschlagsereignisse in Baden-Württemberg und Bayern" KLIWA-Berichte, Heft 8.
- Bartels, H., B. Dietzer, G. Malitz, F.M. Albrecht, J. Guttenberger, 2005: KOSTRA-DWD-2000, Starkniederschlagshöhen für Deutschland (1951-2000), Fortschreibungsbericht, DWD.
- Bülow, K., B. Hennemuth, P. Hoffmann, E. Keup-Thiel, A. Kochanowski, O. Krüger, C. Radermacher, R. Schoetter (Hrsg.), 2012: Statistische Verfahren in der Auswertung von Klimamodell- und Impaktmodelldaten. CSC-online Dokument, http://www.climate-service-center.de/031081/index_0031081.html
- Berliner Wetterkarte, 2002-2008, Verein Berliner Wetterkarte e.V. (Hrsg.), in Zusammenarbeit mit Inst. Für Meteorologie, FU-Berlin und Deutscher Wetterdienst.
- Bissolli, P., E. Dittmann, 2004: Objektive Wetterlagenklassen 2204, Klimastatusbericht 2004, Deutscher Wetterdienst, Offenbach.
- BMVBS (Hrsg.) 2009: Tagungsband – 1. KLIWAS Statuskonferenz am 18. und 19. März 2009, BMVBS, Bonn.
http://www.kliwas.de/cln_033/nn_522962/KLIWAS/DE/Service/Downloads/Publikationen/tagungsband_maerz09_bn,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/tagungsband_maerz09_bn.pdf
- Böhm, U., M. Kücken, W. Ahrens, A. Block, D. Hauffe, K. Keuler, B. Rockel, and A. Will, 2006: Cim - the climate version of Im: Brief description and long-term applications. COSMO Newsletter, 6.
- Brasseur, G., von Flotow, P. (Eds.): Klimafolgenforschung zur Beurteilung der Auswirkungen von konvektiven Extremwetterereignissen auf die Schadenlast in Deutschland. CSC Report 1. Climate Service Center, 2010.
- Collins, M., Ben B. Booth, G. R. Harris, J. M. Murphy, D. M. H. Sexton, M. J. Webb, 2006: Towards quantifying uncertainty in transient climate change. *Climate Dynamics* (2006) 27: 127–147, DOI 10.1007/s00382-006-0121-0
- Forschungsverbund KLIF (Hrsg.), 2011: Forschungsverbund „Klimafolgenforschung“ KLIF, Zwischenbericht 2011, Teil 1: Berichte der Querschnitts- und Forschungsthemen und Bericht der Gesamtkoordination.
- Frei, C. und C. Schär, 2001: Detection probability in rare events: Theory and application to heavy precipitation in the Alpine region. *J. Climate* 14, 1568-1584.
- Grieser, J., C. Beck, 2002: Extremniederschläge in Deutschland Zufall oder Zeichen? Klimastatusbericht, DWD.
- Grünwald, U., S. Schümborg, B. Wöllecke, G. G.v. Riesenbeck, K. Piroth (2009): Gutachten Zu Entstehung und Verlauf des extremen Niederschlag-Abfluss-Ereignisses am 26.07.2008 im Stadtgebiet von Dortmund. Cottbus, Karlsruhe, Köln.
- Hatzfeld, F., Castro, D., Einfalt, T., Frerichs, S., Friedeheim, K., Kubik, A., Mittelstädt, R., Müller, M., Seltmann, J., Wagner, A., 2008: Vorhersage und Management von Sturzfluten in urbanen Gebieten (URBAS), Schlussbericht des vom BMBF geförderten Vorhabens, <http://www.urbanesturzfluten.de/schlussbericht>, Aachen.
- Hundecha, Y., A. Bardossy, 2005: Trends in daily precipitation and temperature extremes across western Germany in the second half of the 20th century. *Int. Journal of Climatology* 25: 1189–1202.
- Hydro & Meteo GmbH&Co. KG. Lübeck, 2010: Analyse der objektiven Wetterlagen im Hinblick auf eine Anwendung beim Downskaling von Niederschlagsdaten aus den Klimaprojektionen- Bericht.

- Jacob, D., 2001: A note to the simulation of the annual and inter-annual variability of the water budget over the Baltic Sea drainage basin. *Meteorology and Atmospheric Physics*, Vol.77, Issue 1-4, 61-73
- Jacob D., H. Göttel, S. Kotlarski, Ph. Lorenz, K. Sieck, 2008: Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland -- Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland, Abschlussbericht zum UFOPLAN-Vorhaben 204 41 13
- Karagiannidis, A., T. Karacostas, P. Maheras, T. Makrogiannis, 2009: Trends and seasonality of extreme precipitation characteristics related to mid-latitude cyclones in Europe. *Adv. Geosci.*, 20, 39–43.
- Kjellström, E., L. Bärring, S. Gollvik, U. Hansson, C. Jones, P. Samuelsson, M. Rummukainen, Ullerstig, A., Willén, U., and Wyser, K., 2005: A 140-year simulation of European climate with the new version of the Rossby Centre regional atmospheric climate model (RCA3), SMHI Reports Meteorology and Climatology, 108, SMHI, SE-60176 Norrköping, Sweden, 54 pp.
- Kürbis, K., M. Mudelsee, G. Tetzlaff, R. Brázdil, 2009: Trends in extremes of temperature, dew point, and precipitation from long instrumental series from central Europe. *Theor. Appl. Climatology* 9, 187-195.
- LANUV NRW (Hrsg.), 2010: Extremwertstatistische Untersuchung von Starkniederschlägen in NRW (ExUS) – Veränderungen in Dauer, Intensität und Raum auf Basis beobachteter Ereignisse und Auswirkungen auf die Eintretenswahrscheinlichkeit, Abschlussbericht erstellt für das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV NRW) durch die Arbeitsgemeinschaft aqua_plan GmbH, hydrometeo GmbH & Co. KG und dr.papadakis GmbH, http://www.umwelt.nrw.de/umwelt/pdf/klimawandel/bericht_exus_teil1.pdf
http://www.umwelt.nrw.de/umwelt/pdf/klimawandel/bericht_exus_teil2.pdf
- Łupikasza, E. B., S. Hänsel, J. Matschullat, 2011: Regional and seasonal variability of extreme precipitation trends in southern Poland and central-eastern Germany 1951–2006. *Int. Journal of Climatology* 31: 2249–2271.
- Malitz, G. 2005: KOSTRA-DWD-2000, Starkniederschlagshöhen für Deutschland (1951-2000) Grundlagenbericht, DWD.
- Malitz, G. C. Beck, J. Grieser, 2011: Veränderung der Starkniederschläge in Deutschland, in Warnsignal Klima: Genug Wasser für alle?, Hrsg. J.L. Lozan, H. Graßl, P. Hupfer, I-Karbe, C-D. Schönwiese, Kap.
- Mann, H.B., D.R. Whitney, 1947: On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. *Annals of Mathematical Statistics* 18:50–60.
- Meijgaard, E. van, L.H. van Ulft, W.J. van de Berg, F.C Bosveld, B.J.J.M. van den Hurk, G. Lenderink, A.P. Siebesma, 2008: The KNMI regional atmospheric climate model RACMO, version 2.1. KNMI Technical Report 302, 43 pp. Available from KNMI, Postbus 201, 3730 AE, De Bilt, The Netherlands.
- Mudelsee M, 2010: *Climate Time Series Analysis*. Springer, Dordrecht, 474 S.
- M&D Technical Report No.3 "Ensemble Simulations over Europe with the regional Climate Model CLM forced with IPCC AR4 Global Scenarios" (2008).
- Nakicenovic, N., R. Swart, 2000: IPCC, (Eds.) Cambridge CB2 2RU ENGLAND
Cambridge University Press, UK. pp 570
- Pettitt AN. 1985: Mann–Whitney–Wilcoxon statistic. In: Kotz S, Johnson NL, Read CB (Ed.) *Encyclopedia of statistical sciences*. Vol. 5, Wiley, New York, 208–211.
- Schönwiese, C.-D., R. Janoschitz, 2005 : *Klima-Trendatlas Deutschland 1901 – 2000*. Berichte des Instituts für Atmosphäre und Umwelt der Universität Frankfurt Nr. 4.
- UBA, 2008: *Kosten-Nutzen-Analyse von Hochwasserschutzmaßnahmen*, UBA-Text 31-08.
- F. Wilcoxon, 1945: Individual comparisons by ranking methods. *Biometrics Bulletin* 1:80–83.

Zolina, O., C. Simmer, A. Kapala, S. Bachner, S. Gulev, H. Marchel, 2008: Seasonally dependent changes of precipitation extremes over Germany since 1950 from a very dense observational network. *J. Geophys. Res.*, 113, D06110.

7 Glossar

Fachvokabular der Versicherungswirtschaft:

Anzahl der Verträge: Anzahl der Versicherungsverträge bzw. Policen.

Schadenanzahl: Es handelt sich dabei um die Anzahl der Schäden, die in Folge eines Ereignisses reguliert wurden.

Schadenaufwand: Der finanzielle Aufwand für einen Schaden bzw. die Summe der Schäden in Euro.

Schadenhäufigkeit: Verhältnis von Schadenanzahl zu Anzahl der Verträge (in Prozent).

Schadensatz: Verhältnis von Schadenaufwand zu Versicherungssumme (in Promille).

Versicherungssumme: die versicherte Gesamtsumme in einem Gebiet (z.B. Kreise).

Meteorologisches Fachvokabular:

Advektion: Transport von Luftmassen (z.B. polare, subtropische) durch großräumige Strömung in die betreffende Region

Frontal / postfrontal: In der Region einer Front / hinter einer Front

Höhendiffluenz: Auseinanderströmen der Luft in größerer Höhe (meist 3000 m bis 6000 m ü. NN). Das kann in geringen Höhen ein Zusammenströmen (Konfluenz) und Aufsteigen von Luftmassen bedeuten.

Höhentief: Ein Höhentief ist ein Tiefdruckgebiet in höheren atmosphärischen Schichten (meist in fünf Kilometer Höhe), das mit Kaltluft angefüllt ist. Auf den Bodenwetterkarten sind Höhentiefs meist nicht nachweisbar, sondern nur auf der Höhenwetterkarte (z.B. 500 hPa-Karte).

(Quelle: <http://www.wetteronline.de/wotexte/redaktion/lexikon/hoehentief.htm>)

Höhentief haben wegen in ihnen stattfindender Aufwärtsbewegung auch Einfluss auf das Wettergeschehen in Bodennähe.

Kaltfront/Warmfront/Okklusion: Durch Tiefdruckgebiete wird auf der Nordhalbkugel Warmluft nordwärts und Kaltluft südwärts transportiert und damit der Wärmeaustausch zwischen Äquator und Pol in den mittleren Breiten bewerkstelligt. Die gegeneinander strömenden Luftmassen bilden Fronten, entlang derer durch Vertikalbewegungen Wärme transportiert wird. Die vorgelagerte **Warmfront** ist die Luftmassengrenze zwischen vorgelagerter Luft und heranströmender Warmluft. Es findet großräumiges Aufgleiten der Warmluft statt, was meist zu flächenhaftem Nieselregen führt. Die nachfolgende **Kaltfront** ist die Luftmassengrenze zwischen der Warmluft und der von Norden heranströmenden Kaltluft. Es finden intensive, teilweise kleinräumige Aufstiegsprozesse statt, die zu Schauern und auch Gewittern führen können. Hat die schneller vorankommende Kaltfront die Warmfront eingeholt, bildet sich eine **Okklusion**, die die vorgelagerte Luftmasse von der Kaltluft trennt, die Warmluft ist dort vom Boden abgehoben.

Konvektive Ereignisse: Konvektive Ereignisse in der Atmosphäre sind mit aufwärts gerichteten, meist kleinräumig strukturierten Aufstieg von Luftmassen verbunden. Sie können ausgelöst werden durch atmosphärische Fronten, an denen teils hochreichende und

intensive Hebungsprozesse stattfinden, durch lokal stark überhitzte bodennahe Luft oder durch Anströmung von Hindernissen wie Gebirgen.

Konvergenzzone: Eine Region, meist entlang einer Linie, mit zusammenlaufenden Stromlinien, d.h. zusammenströmender Luft. Dadurch wird die Luft im Bereich der Konvergenzzone zum Aufsteigen gezwungen.

Labile/stabile Schichtung: Die Schichtung in der atmosphärischen Grenzschicht (bis zu 2, selten bis 3 km Höhe) wird von den Wärmeflüssen am Erdboden bestimmt. Nachts findet durch Abstrahlung eine Abkühlung der Oberfläche statt, die durch Luftaustausch nach oben weitergeleitet wird. Die Luft ist stabil geschichtet, d.h. die potentielle Temperatur (Lufttemperatur einschließlich der potentiellen Energie des jeweiligen Höhengniveaus) nimmt mit der Höhe zu, ein aufsteigendes Luftpaket, das sich adiabatisch bewegt, ist stets kälter als die Umgebungsluft und sinkt wieder ab. Wird die Erdoberfläche tagsüber durch Einstrahlung erwärmt, wird ein aufsteigendes Luftpaket stets wärmer als die Umgebungsluft sein und weiter aufsteigen. Die Schichtung ist labil. Somit werden Vertikalbewegungen in labiler Schichtung verstärkt, in stabiler Schichtung unterdrückt. Oberhalb der Grenzschicht, ist die Atmosphäre meist schwach stabil geschichtet, durch starke vertikale Umschichtungen oder durch freiwerdende Wärme durch Kondensation von Wasser kann auch labile Schichtung erreicht werden.

Luv- und Leelage: „Dieser Begriff wurde der Seemannssprache entnommen. Er steht für die dem Wind abgewandte (windgeschützte) Seite eines Gebirges oder Hindernisses. Im Gegensatz dazu bezeichnet Luv die dem Wind zugewandte (windoffene) Seite. Die Leeseite eines Gebirges ist immer die mit der geringeren Feuchtigkeit, die Luvseite bekommt sehr viel häufiger und in größeren Mengen Regen oder Schnee ab.“ (Quelle: Wetter Lexikon von <http://www.wetter.net/>)

Synoptik: Die Synoptik „ist ein Teilgebiet der Meteorologie. Man versteht darunter die für eine Wettervorhersage notwendige großräumige Wetterbeobachtung.“ (Quelle: Wetter Lexikon von <http://www.wetter.net/>)

Tiefdruckrinne: Eine Tiefdruckrinne ist eine in der Wetterkarte (meist Bodenwetterkarte) erkennbare ‚Zunge‘ tiefen Luftdrucks, die mehrere Tiefdruckgebiete entlang ihrer Achse aufweisen kann. Es handelt sich also nicht um einzelne abgeschlossene Tiefdruckzentren, sondern um einen größeren Bereich.

Trog: Ein Trog ist auf der Nordhalbkugel ein aus der Polregion mit tiefem Luftdruck nach Süden mäanderndes Gebiet, in dem Kaltluftvorstöße nach Süden stattfinden. Diese Luftdruckgebilde treten in der mittleren bis hohen Troposphäre auf und steuern die Tiefdruckgebiete in der unteren Troposphäre.

Zyklonalität/Antizyklonalität: Zyklonalität, bzw. Antizyklonalität leitet sich aus dem Fachbegriff für Tiefdruckgebiete (Zyklonen) und Hochdruckgebiete (Antizyklonen) ab und beschreibt Wetterlagen, die unter dem Einfluss dieser synoptischen Systeme stehen. Um Zyklonen bewegt sich auf der Nordhalbkugel die Luft gegen den Uhrzeigersinn, um Antizyklonen im Uhrzeigersinn. Auf der Südhalbkugel ist dies genau umgekehrt.

Statistisches Fachvokabular:

Korrelation: Der Korrelationskoeffizient – eine Größe zwischen -1 und 1 – gibt den statistischen Zusammenhang zwischen zwei Variablen an, in dieser Studie zwischen zwei Zeitreihen. Es gibt unterschiedliche Korrelationskoeffizienten, die entweder die Originaldaten (Korrelation nach Pearson) oder Ränge (Korrelation nach Spearman) in einen Zusammenhang setzen.

Quantil: Quantile sind Merkmale der Häufigkeitsverteilung des Niederschlags und geben bspw. den Wert an, oberhalb dessen nur 10 % und unterhalb dessen 90 % aller Werte liegen (90% Quantil oder 90. Perzentil).

Signifikanz: In der Terminologie der Statistik bedeutet signifikant, dass eine Null-Hypothese (z.B. 'Zwei Zeitreihen sind gleich') mittels einer Teststatistik zu einem vorher festgelegten Irrtumsniveau abgelehnt wird. Ein Signifikanztest kann für viele Verfahren, z.B. Trendbestimmung durchgeführt werden (Bülow et al., 2012).

Wiederkehrperiode: Die Wiederkehrperiode $1/p$ ist der reziproke Werte der Wahrscheinlichkeit p , mit der ein Ereigniswert z_p durch das jährliche Maximum in jedem beliebigen Jahr überschritten wird.

Anhang

Tabelle 1 Ereigniszeiträume

Tabelle 2 Übersicht über die Korrelation der maximalen Tagessumme mit Schadensparametern auf Kreisebene in Bayern.

Ergebnisse aus ExUS als Zusammenfassung:

Zusammenfassung der Hauptwerte (Jahressummen, Halbjahresniederschlagssummen und Monatssummen)

Die Untersuchung der Trends in den **Jahresniederschlagssummen** zeigt für den Gesamtzeitraum 1950-2008 überwiegend positive Trends zwischen 0 mm/Jahr und +3,7 mm/Jahr. An etwa jeder zweiten Station liegen diese positiven Trends auf einem Signifikanzniveau von mindestens 80 %. Diese überwiegend positiven Trends der Jahresniederschlagssummen sind dabei im Wesentlichen auf die fast ausschließlich signifikant positiven Trends zwischen 0 mm/Jahr und +3,4 mm/Jahr im **Winterhalbjahr** zurückzuführen. Bricht man die Niederschlagssummen des Winterhalbjahres auf kleinere Bilanzierungszeiträume (**Quartale, Monate**) herunter, so konzentrieren sich diese signifikanten Zunahmen im Wesentlichen auf das meteorologische Winterquartal (Dezember-Februar) sowie im besonderen Maße auf den Monat März. Im Sommerhalbjahr zeigen sich dagegen zwischen 1950-2008 nur geringfügige, überwiegend nicht signifikante Trends zwischen -1,0 mm/Jahr und +0,9 mm/Jahr. Bei der Untersuchung der Monatsniederschlagssummen zeigt sich aber eine Konzentration der Rückgänge in den Monaten Juli und August, welche im Wesentlichen durch eine Zunahme in den Monaten September und Oktober ausgeglichen wird.

Bei der **räumlichen Untersuchung** des Trendverhaltens sticht die Region im Dreieck der Ortschaften Lüdenscheid-Lindlar-Siegen an der Grenze des Bergischen Landes zum Sauer- und Siegerland heraus. In dieser Region liegen konzentriert mehrere Stationen, an denen stärkere Zunahmen der Jahresniederschlagssummen (>+3,7 mm/Jahr) auf einem sehr hohem Signifikanzniveau ($\geq 95\%$) festgestellt wurden.

Weiter fällt im Sommerhalbjahr eine relativ klare räumliche Abgrenzung zwischen Stationen mit positiven Trends und Stationen mit negativen Trends auf. Während nördlich der Ruhr und in der Region im Dreieck der Ortschaften Lüdenscheid-Lindlar-Siegen überwiegend positive Trends auftreten, sind die Trends in den übrigen Regionen Nordrhein-Westfalens überwiegend negativ.

In den **Mittelgebirgen** fällt darüber hinaus grundsätzlich auf, dass hier in unmittelbarer Nachbarschaft einerseits hohe signifikante positive Trends und andererseits schwache positive Trends auf einem geringen Signifikanzniveau oder gar negative Trends auftreten können. Die Aussagekraft einzelner lokaler Stationen im Hinblick auf die umliegende Region ist somit in den Mittelgebirgen wesentlich geringer als in den Tiefländern.

Kenngrößen

Es wurden die Anzahl der Tage pro Jahr mit

- $\leq 0,1$ mm/Tag (niederschlagsfreie Tage)
- >10 mm/Tag
- >20 mm/Tag
- >30 mm/Tag

auf Vorliegen eines Trends (Lineare Regression und Mann-Kendall) untersucht.

Die Anzahl der **Tage $\leq 0,1$ mm/Tag** nimmt bei Betrachtung des Gesamtzeitraumes in den Winterhalbjahren flächendeckend über ganz NRW ab, in den Sommerhalbjahren dagegen zu. Hier finden sich in den Mittelgebirgen auch Stationen mit abnehmenden Trends. Für

beide Halbjahre ist der Trend an ungefähr der Hälfte der Stationen signifikant. In den Winterhalbjahren bewegen sich die Trends an fast 90 % der Stationen in einem Bereich bis - 0,4 Tage/Jahr. Dies bedeutet eine Änderung von ca. 20 Tagen in den letzten 58 Jahren. In den Sommerhalbjahren ist der Trendbereich mit 0,2 Tagen/Jahr nur halb so groß.

Die Auswertung der Entwicklung der Anzahl der Tage pro Jahr mit **Niederschlag über einer festen Grenze** zeigte in den **Winterhalbjahren** für die Tage >10 mm/Tag und >20 mm/Tag über ganz NRW fast ausschließlich Stationen mit steigenden Trends. Jeweils ca. 2/3 dieser Trends liegen auf einem Signifikanzniveau >80 %. Bei der Anzahl der Tage >10 mm/Tag haben 75 % der Stationen einen positiven Trend von <0,1 Tage/Jahr, entsprechend einem Zuwachs von ca. 5 Tagen pro Jahr in 50 Jahren. Bei der Anzahl der Tage >20 mm/Tag haben 90 % der Stationen einen Anstieg von <0,05 Tage/Jahr.

Bei den Tagen mit den höchsten Niederschlägen (>30 mm/Tag) ist das Ergebnis nicht so homogen. Hier sind auch nur 40 % der Trends signifikant. Westlich des Rheins und am Niederrhein überwiegen abnehmende Trends, im nördlichen Weserbergland ist das Verhältnis von Zu- und Abnahmen ausgeglichen, im übrigen NRW überwiegen steigende Trends. Über 80 % der Stationen weisen hier einen geringeren Trend als $\pm 0,02$ Tage/Jahr auf, das entspricht einer Zunahme von einem Starkregentag in den letzten 50 Jahren.

In den **Sommerhalbjahren** verhält sich die Entwicklung der Anzahl der Tage >30 mm/Tag sehr ähnlich wie in den Winterhalbjahren. Bei diesen, aber auch bei der Anzahl der Tage >10 mm/Tag und >20 mm/Tag ist die die Größe des Trendbereiches, innerhalb dessen die deutliche Mehrheit der Stationen liegt, in den Sommerhalbjahren nur halb so groß wie in den Winterhalbjahren. Auch ist hier die Anzahl der Stationen mit signifikanten Trends geringer als in den Winterhalbjahren.

Für die Anzahl der Tage >10 mm/Tag und >20 mm/Tag findet man in den Sommerhalbjahren eine Konzentration steigender Trends in der Emscher-Lippe-Region. Bei der Anzahl der Tage >10 mm/Tag überwiegen im übrigen NRW leicht Stationen mit abnehmenden Trends, bei den Tagen >20 mm/Tag dagegen leicht Stationen mit steigenden Trends.

Niederschlagsverhalten kurzer Zeitdauern

Zur Beschreibung des **Niederschlagsverhaltens kurzer Zeitdauern** (5 Minuten bis 3 Tage) wurden partielle Serien nach folgenden Gesichtspunkten auf mögliche Entwicklungen untersucht:

- Ereignisse je Dauerstufe und Jahr aller Stationen nach
 - Anzahl der Ereignisse und
 - mittlerer Höhe der 15 höchsten Ereignisse

Die **mittlere Anzahl** von Starkregenereignissen in NRW variiert je nach Jahr und Dauerstufe. Dabei hat die Anzahl der Starkregenereignisse in den letzten 10 Jahren des Beobachtungszeitraum in den einzelnen Dauerstufen unterschiedlich stark zugenommen. Die Anzahl von Extremereignissen kurzer Dauerstufen (≤ 1 Stunde), die für die Siedlungsentwässerung eine große Rolle spielen, nimmt dabei überdurchschnittlich zu. Dies ist aber auf eine Überlagerung von Effekten aus einer veränderten Gerätetechnik und den Folgen des Klimawandels zurückzuführen.

Ab 1990 bzw. 2000 wurde die Gerätetechnik auf präziser arbeitende Wippengeräte bzw. Wägegeräte umgestellt, die eine genauere Aufzeichnung von Spitzenniederschlagsintensitäten ermöglichen. Für die Dauerstufen 5 Minuten, abgeschwächt für 15 Minuten und im noch geringeren Maße für 60 Minuten zeigen die Auswertungen, dass ab 1997 die Anzahl von Ereignissen pro Jahr höher ist, als dies in den Auswertungen für Dauerstufen ab 2 Stunden erkennbar ist.

Zudem hat es eine Häufung besonders starker Ereignisse bereits in den 1950er- und in der zweiten Hälfte der 1960er-Jahre gegeben. Es wird zu prüfen sein, ob in Zukunft die Häufigkeit der Starkregen wieder abnimmt, auf einem hohen Niveau verbleibt oder sogar weiter zunimmt. Für alle Dauerstufen gilt aber, dass keiner der beobachteten Trends statistisch signifikant ist. Anders als bei der Häufigkeit von Starkregenereignissen sind keine

signifikanten Änderungen der Niederschlagsmengen über die Zeit festzustellen. Die **mittlere Höhe der Starkregenereignisse** je Dauerstufe wird über die Jahre als konstant eingestuft.

Tabelle 1: Ereigniszeiträume a) durch den GDV definiert, b) 3-tägige Ereigniszeiträume

a)

Ereignis	Beginn	Ende	Jahr
1	12/07/1997	20/07/1997	1997
2	23/10/1998	03/11/1998	1998
3	13/07/1999	13/07/1999	1999
4	27/06/2001	27/06/2001	2001
5	18/07/2002	18/07/2002	2002
6	31/07/2002	04/09/2002	2002
7	27/12/2002	09/01/2003	2003
8	26/05/2003	14/06/2003	2003
9	11/07/2003	27/07/2003	2003
10	17/07/2004	24/07/2004	2004
11	28/06/2005	01/07/2005	2005
12	27/07/2005	01/08/2005	2005
13	17/08/2005	27/08/2005	2005
14	19/06/2006	13/07/2006	2006
15	22/07/2006	10/08/2006	2006
16	21/05/2007	01/06/2007	2007
17	05/06/2007	27/06/2007	2007
18	15/07/2007	27/07/2007	2007
19	03/08/2007	27/08/2007	2007
20	27/09/2007	04/10/2007	2007
21	29/05/2008	30/05/2008	2008
22	02/06/2008	04/06/2008	2008
23	26/07/2008	04/08/2008	2008
24	19/07/1999	19/07/1999	1999
25	11/05/2002	11/05/2002	2002
26	08/07/2004	08/07/2004	2004

b)

Ereignis	Beginn	Ende	Jahr
6	19/08/2002	22/08/2002	2002
6B	01/08/2002	02/08/2002	2002
7	01/01/2003	04/01/2003	2003
8	07/06/2003	10/06/2003	2003
8B	02/06/2003	05/06/2003	2003
9	15/07/2003	18/07/2003	2003
9B	20/07/2003	23/07/2003	2003
10	17/07/2004	20/07/2004	2004
11	28/06/2005	01/07/2005	2005
12	28/07/2005	31/07/2005	2005
13	19/08/2005	22/08/2005	2005
14	05/07/2006	08/07/2006	2006
14B	18/06/2006	21/06/2006	2006
15	26/07/2006	29/07/2006	2006
15B	21/07/2006	24/07/2006	2006
16	25/05/2007	28/05/2007	2007

16B	22/05/2007	25/05/2007	2007
17	09/06/2007	12/06/2007	2007
17B	14/06/2007	17/06/2007	2007
18	20/07/2007	23/07/2007	2007
19	08/08/2007	11/08/2007	2007
19B	21/08/2007	24/08/2007	2007
20	27/09/2007	30/09/2007	2007
21	28/05/2008	31/05/2008	2008
22	02/06/2008	05/06/2008	2008
23	25/07/2008	28/07/2008	2008
23B	01/08/2008	04/08/2008	2008
25	11/05/2002	12/05/2002	2002
30	01/05/2004	04/05/2004	2004
31	13/08/2004	16/08/2004	2004
32	03/08/2006	06/08/2006	2006
33	26/07/2008	27/07/2008	2008

Tabelle 2: Übersicht über die Korrelation der maximalen Tagessumme mit Schadensparametern auf Kreisebene in Bayern.
n.A. = nicht analysiert (keine Daten vorhanden oder Datensatz enthält weniger als drei Wertepaare)

Ereignis	Jahr	Monat	Korrelation- Pearson			Korrelation- Spearmann			r ²
			Schadenhäufigkeit	Schadensatz	Schadenssumme	Schadenhäufigkeit	Schadensatz	Schadenssumme	
1	1997	Juli	n.A.	n.A.	n.A.	n.A.	n.A.	n.A.	n.A.
2	1998	Okt/Nov	n.A.	n.A.	n.A.	n.A.	n.A.	n.A.	n.A.
3	1999	Juli	n.A.	n.A.	n.A.	n.A.	n.A.	n.A.	n.A.
4	2001	Juni	n.A.	n.A.	n.A.	n.A.	n.A.	n.A.	n.A.
5	2002	Juli	-0.36	-0.29	-0.29	-0.44	-0.76	-0.44	0.13
6	2002	Juli/August	0.09	-0.05	-0.01	0.14	0.13	0.10	0.01
7	2003	Dez/Jan	0.42	0.41	0.41	0.56	0.49	0.34	0.29
8	2003	Mai/Juni	0.04	0.25	0.26	-0.01	0.01	0.14	0.00
9	2003	Juli	0.07	-0.12	-0.10	-0.06	-0.18	-0.22	0.00
10	2004	Juli	0.14	0.01	-0.07	0.30	0.23	0.01	0.02
11	2005	Juni	0.10	0.19	0.32	0.08	0.22	0.35	0.01
12	2005	Juli	0.78	0.66	0.37	0.36	0.32	0.24	0.77
13	2005	August	0.60	0.54	0.54	0.41	0.42	0.54	0.34
14	2006	Juni/Juli	0.26	0.03	0.12	0.26	0.12	0.12	0.07
15	2006	Juli/August	-0.26	-0.20	-0.12	-0.29	-0.24	-0.12	0.07
16	2007	Mai	-0.08	-0.03	0.18	-0.10	0.08	0.30	0.01
17	2007	Juni	0.00	-0.03	0.15	0.04	0.01	0.04	0.01
18	2007	Juli	0.09	0.06	0.05	0.00	0.00	0.13	0.01
19	2007	August	0.25	0.29	0.29	0.18	0.23	0.39	0.04
20	2007	Sep/Okt	-0.22	-0.32	-0.47	-0.34	-0.33	-0.31	0.04
21	2008	Mai	n.A.	n.A.	n.A.	n.A.	n.A.	n.A.	n.A.
22	2008	Juni	0.46	0.40	0.30	0.11	0.03	-0.03	0.18
23	2008	Juli/August	-0.02	-0.03	0.02	0.00	-0.10	0.01	0.00
24	1999	Juli	n.A.	n.A.	n.A.	n.A.	n.A.	n.A.	n.A.
25	2002	Mai	0.36	0.33	0.25	0.17	-0.03	-0.13	0.10
26	2004	Juli	n.A.	n.A.	n.A.	n.A.	n.A.	n.A.	n.A.
		Mittelwert	0.14	0.11	0.12	0.07	0.03	0.08	0.11

