Bewertung der Starkregengefährdung in hessischen Einzugsgebieten – Eine GIS-gestützte Analyse von Tagesniederschlagsdaten und räumliche Zuordnung zu Einzugsgebieten

Masterthesis

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Master of Science (M. Sc.)

an der Universität Koblenz

Fachbereich Angewandte Umweltwissenschaften

vorgelegt von

Herr Nenad Stanisic

aus Göttingen

Koblenz, 2026

Bewertung der Starkregengefährdung in hessischen Einzugsgebieten – Eine GIS-gestützte Analyse von Tagesniederschlagsdaten und räumliche Zuordnung zu Einzugsgebieten

Masterthesis

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Master of Science (M. Sc.)

an der Universität Koblenz

Fachbereich Angewandte Umweltwissenschaften

vorgelegt

am 31. März 2026

von Nenad Stanisic

geb. am 21. November 1990

Referent/in: Prof. Dr. Petra Schneider, Hochschule Magdeburg-Stendal

Koreferent/in: PD Dr. Heike Hübener, Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung 8

2. Grundlagen 8

2.1 Untersuchungsgebiet Hessen 8

2.2 Klimatische Rahmenbedingungen und Niederschlagsverteilung 9

2.3 Messnetz und Datenverfügbarkeit 10

2.4 Datengrundlage 11

3. Methodik 11

3.1 Datenbasis und Datengrundlagen 13

3.2 Definition der Zielgrößen und Analyseindikatoren 14

3.3 Datenaufbereitung und Vorverarbeitung (Python/Thonny) 16

3.4 GIS-gestützte Verarbeitung und Visualisierung (QGIS) 18

3.5 Trendanalyse (stationsbasiert) 20

3.6 Bruchpunktanalyse (stationsbasiert) 21

3.7 Räumliche Einordnung und hydrologischer Bezug (Fließpfadkarten) 23

3.8 Methodische Grenzen und Unsicherheiten 23

4. Resultate 25

4.1 Datengrundlage und effektive Auswertungsbasis 25

4.1.1 Primärdatenquelle und Untersuchungsumfang 26

4.1.2 Zeitliche Entwicklung der Stationsverfügbarkeit 26

4.1.3 Umgang mit fehlenden Messwerten und Datenkennzeichnung 27

4.1.4 Definition der effektiven Auswertungsbasis 28

4.1.5 Räumliche Referenzierung der Datengrundlage 29

4.1.6 Zusammenfassende Bewertung der Datengrundlage 29

4.2 Deskriptive Analyse der maximalen Tagesniederschläge 30

4.2.1 Zeitliche Entwicklung der jährlichen Maxima extremer Tagesniederschläge 30

4.2.2 Räumliche Verteilung der Extremniederschläge 31

4.2.3 Interannuelle Variabilität und auffällige Extremjahre 32

4.2.4 Stationsspezifische Unterschiede der Extremniederschläge 34

4.3 Trendanalyse der maximalen Tagesniederschlagssummen 35

4.3.1 Räumliche Verteilung der Trendstationen 36

4.3.2 Zeitliche Einordnung der Trendbeginne 37

4.3.3 Zusammenfassende Bewertung der Trendanalyse 37

4.4 Bruchpunktanalyse der maximalen Tagesniederschlagssummen 37

4.4.1 Identifikation von Stationen mit Bruchpunkten 37

4.4.2 Zeitliche Häufung und Verteilung der Bruchpunkte 39

4.4.3 Räumliche Verteilung der Bruchpunktstationen 39

4.4.4 Verhältnis von Bruchpunkten und Trends 39

4.4.5 Zusammenfassende Bewertung der Bruchpunktanalyse 39

4.5 Räumliche Einordnung der Trendstationen und hydrologischer Bezug ... 40
4.5.1 Meißner (51.2185°N, 9.8228°E) ... 40
4.5.2 Schwalmstadt-Ascherode (50.9033°N, 9.2129°E) ... 40
4.5.3 Neustadt (50.8494°N, 9.1253°E) ... 41
4.5.4 Ottrau-Immichenhain (50.81°N, 9.3581°E) ... 41
4.5.5 Münzenberg-Gambach (50.4521°N, 8.7318°E) ... 41
4.5.6 Usingen (50.3426°N, 8.53172°E) ... 42
4.5.7 Flörsbachtal-Flörsbach (50.1344°N, 9.4083°E) ... 42
4.5.8 Zusammenfassende Bewertung der räumlichen Einordnung ... 42
4.6 Einfluss des Jahres 1981 auf die Ergebnisstruktur ... 43
4.6.1 Entwicklung der Messabdeckung im Untersuchungszeitraum ... 43
4.6.2 Gesamtanzahl der ausgewerteten Jahresmaxima - Schnittjahr 1980 ... 44
4.6.3 Gesamtanzahl der ausgewerteten Jahresmaxima - Schnittjahr 1985 ... 44
4.6.4 Jahreshöchstwerte ≥ 50 mm – Schnittjahr 1980 ... 45
4.6.5 Jahreshöchstwerte ≥ 50 mm – Schnittjahr 1985 ... 45
4.6.6 Verteilung nach Intensitätsklassen ... 46
4.6.7 Zusammenfassende Bewertung des Einflusses des Jahres 1981 ... 47
5. Diskussion ... 48
5.1 Zusammenfassende Einordnung der Hauptergebnisse ... 48
5.1.1 Physikalischer Hintergrund und großräumiger Klimakontext ... 50
5.1.2 Empirische Trends extremer Niederschläge in Deutschland ... 51
5.1.3 Einordnung der hessischen Ergebnisse im regionalen Kontext ... 52
5.2 Methodische Einordnung und Unsicherheiten ... 53
5.2.1 Einfluss von Messmethoden und Datenhomogenität ... 53
5.2.2 Sensitivität gegenüber Einzeljahren – der Fall 1981 ... 53
5.2.3 Hohe natürliche Variabilität extremer Tagesniederschläge ... 54
5.2.4 Stationslänge und statistische Aussagekraft ... 54
5.2.5 Grenzen der hydrologischen Einordnung ... 55
5.2.6 Gesamtbewertung der methodischen Einordnung ... 56
5.3 Anwendungsbezug und praktische Relevanz ... 56
5.3.1 Punktuelle Trends und lokale Verwundbarkeit ... 57
5.3.2 Hydrologische Relevanz der Stationslage ... 57
5.3.3 Bedeutung nicht-signifikanter Trends für die Praxis ... 57
5.3.5 Gesamtbewertung der anwendungsbezogenen Bedeutung ... 58
6. Fazit ... 58
7. Literaturverzeichnis ... 60
8. Anhang ... 63

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Orographische Übersichtskarte von Hessen 9
Abbildung 2: Mittlerer Jahresniederschlag in Hessen im Zeitraum 1991-2020 10
Abbildung 3: Räumliche Verteilung der Messstationen in Hessen 13
Abbildung 4: Anzahl der verfügbaren Stationsjahre im Zeitraum 1870–2024 27
Abbildung 5: Verteilung der Messstationen nach Zeitreihenlänge 28
Abbildung 6: Zeitliche Entwicklung der jährlichen maximalen Tagesniederschläge (1870-2024) 30
Abbildung 7: Räumliche Verteilung extremer Tagesniederschläge in ausgewählten Extremjahren 33
Abbildung 8: Stationsspezifische maximale Tagesniederschläge der Top-10-Stationen in Hessen 34
Abbildung 9: Räumliche Verteilung signifikanter Trendstationen in Hessen 36
Abbildung 10: Beispiele von Zeitreihen mit identifizierten Bruchpunkten an ausgewälten Stationen 38
Abbildung 11: Entwicklung der Messabdeckung (> 0 mm pro Jahr) im Zeitraum 1870-2024 43
Abbildung 12: Gesamtzahl der in die Analyse einbezogenen Jahresmaxima (Schnittjahr 1980) 44
Abbildung 13: Gesamtzahl der in die Analyse einbezogenen Jahresmaxima (Schnittjahr 1985) 44
Abbildung 14: Gesamtzahl der Jahreshöchstwerte ≥ 50 mm (Schnittjahr 1980) 45
Abbildung 15: Gesamtzahl der Jahreshöchstwerte ≥ 50 mm (Schnittjahr 1985) 45
Abbildung 16: Häufigkeit von Jahreshöchstwerten ≥ 50 mm nach Intensitätsklassen 47
Abbildung D1: Verteilung der Jahreshöchstwerte ≥ 50 mm nach Intensitätsklassen 74

Tabellenverzeichnis

Tabelle A1:Ranking der zehn Jahre mit der höchsten Häufigkeit intensiver Tagesniederschläge 63
Tabelle B1: Ergebnisse der Trendanalyse auf Stationsebene mit Koordinaten 67
Tabelle C1: Ergebnisse der Bruchpunktanalyse aller Stationen 73

Zusammenfassung

Diese Arbeit untersucht die langfristige Entwicklung extremer Tagesniederschläge in Hessen im Zeitraum von 1870 bis 2024. Grundlage bilden historische Messdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD), aus denen für jede Station die maximale tägliche Niederschlagssumme pro Jahr ermittelt wird. Die stationsbasierten Daten werden mithilfe eines Geoinformationssystems (GIS) räumlich analysiert und visualisiert, um zeitliche Trends sowie regionale Muster zu identifizieren.

Die Ergebnisse zeigen ein heterogenes Gesamtbild. Extreme Tagesniederschläge weisen eine hohe interannuelle Variabilität auf, wodurch langfristige Trends nur eingeschränkt nachweisbar sind. Signifikante Entwicklungen treten lediglich punktuell auf und zeigen kein landesweit einheitliches Muster. Einzelne Extremjahre können die statistische Auswertung dabei deutlich beeinflussen.

Die Verknüpfung mit Fließpfadanalysen verdeutlicht zudem die hydrologische Relevanz extremer Niederschläge. Insbesondere in kleinräumigen Einzugsgebieten kann es zu einer schnellen Konzentration von Oberflächenabfluss kommen, wodurch auch außerhalb klassischer Überschwemmungsgebiete ein erhöhtes Gefährdungspotenzial besteht.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass die Entwicklung extremer Tagesniederschläge in Hessen durch eine hohe natürliche Variabilität, lokal begrenzte Trends sowie methodische Unsicherheiten geprägt ist. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit einer standortbezogenen Bewertung und vorsorgenden Planung im Umgang mit Starkregenrisiken.

Abstract

This study investigates the long-term development of extreme daily precipitation in Hessen, Germany, over the period from 1870 to 2024. The analysis is based on historical observational data from the German Meteorological Service (DWD), from which the maximum daily precipitation per year is derived for each station. The station-based data are analyzed and visualized using a Geographic Information System (GIS) to identify temporal trends and spatial patterns.

The results reveal a heterogeneous overall picture. Extreme daily precipitation exhibits a high degree of interannual variability, limiting the statistical detectability of long-term trends. Significant trends occur only locally and do not form a consistent pattern across the entire study area. Individual extreme years can substantially influence the statistical evaluation.

The integration of flow path analyses further highlights the hydrological relevance of extreme precipitation. In small catchments, surface runoff can concentrate rapidly, increasing the risk of flooding even outside traditional floodplain areas.

Overall, the findings indicate that the development of extreme daily precipitation in Hesse is characterized by high natural variability, locally limited trends, and methodological uncertainties. These results underline the importance of site-specific assessments and precautionary planning in addressing heavy rainfall risks.

1. Einleitung

Die Niederschlagsverhältnisse in Europa haben sich in den vergangenen Jahrzehnten verändert. Während langanhaltende, gleichmäßig verteilte Niederschlagsereignisse seltener auftreten, wird eine Zunahme kurzzeitiger, intensiver Niederschläge – sogenannter Starkregen – beobachtet. Diese Entwicklung steht im Zusammenhang mit der globalen Erwärmung, die infolge des anthropogenen Klimawandels zu einem erhöhten Wasserdampfgehalt der Atmosphäre führt (IPCC, 2021). Da wärmere Luft mehr Feuchtigkeit aufnehmen kann, steigt das Potenzial für extreme Niederschlagsereignisse, was physikalisch durch die Clausius-Clapeyron-Beziehung beschrieben wird (Held & Soden, 2006).

Für Deutschland zeigen Analysen, dass Niederschlagsverhältnisse regional stark variieren und insbesondere bei extremen Ereignissen eine hohe räumliche und zeitliche Variabilität besteht (DWD, 2023; UBA, 2023). Gleichzeitig weisen Studien darauf hin, dass sich Intensität und Häufigkeit starker Niederschläge in Teilen Europas bereits verändert haben und sich künftig weiter verändern könnten (EEA, 2020; IPCC, 2021).

Vor diesem Hintergrund wird in der vorliegenden Arbeit die Entwicklung extremer Tagesniederschlagssummen im Bundesland Hessen über einen langen Zeitraum untersucht.

Zentrale Forschungsfrage:

Wie haben sich die maximalen Tagesniederschlagssummen in Hessen im Zeitraum von 1870 bis 2024 verändert, und lassen sich daraus regionale oder zeitliche Trends ableiten, die auf eine Zunahme von Starkregenereignissen hinweisen?

Ziel der Arbeit ist es, die langfristige Entwicklung extremer Tagesniederschläge auf Basis historischer Messdaten zu analysieren und räumlich differenziert darzustellen. Dabei wird untersucht, ob sich systematische Veränderungen erkennen lassen und in welchen Regionen diese besonders ausgeprägt sind. Die Analyse basiert auf stationsbezogenen Niederschlagsdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD), aus denen für jede Station und jedes Jahr die maximalen Tageswerte ermittelt werden. Die Auswertung erfolgt deskriptiv und wird durch geographische Visualisierungen ergänzt, um räumliche Muster und zeitliche Entwicklungen zu identifizieren.

2. Grundlagen

2.1 Untersuchungsgebiet Hessen

Das Untersuchungsgebiet dieser Arbeit ist das Bundesland Hessen, das im zentralen Teil Deutschlands liegt und durch eine vielfältige naturräumliche Gliederung gekennzeichnet ist. Die Landschaft Hessens umfasst sowohl Mittelgebirge als auch flachere Becken- und Flusslandschaften. Zu den bedeutendsten Mittelgebirgen zählen die Rhön, der Vogelsberg, der Taunus, der Odenwald sowie Teile des Rothaargebirges. Diese werden durch größere Flusssysteme wie Rhein, Main, Lahn, Fulda und Werra ergänzt.

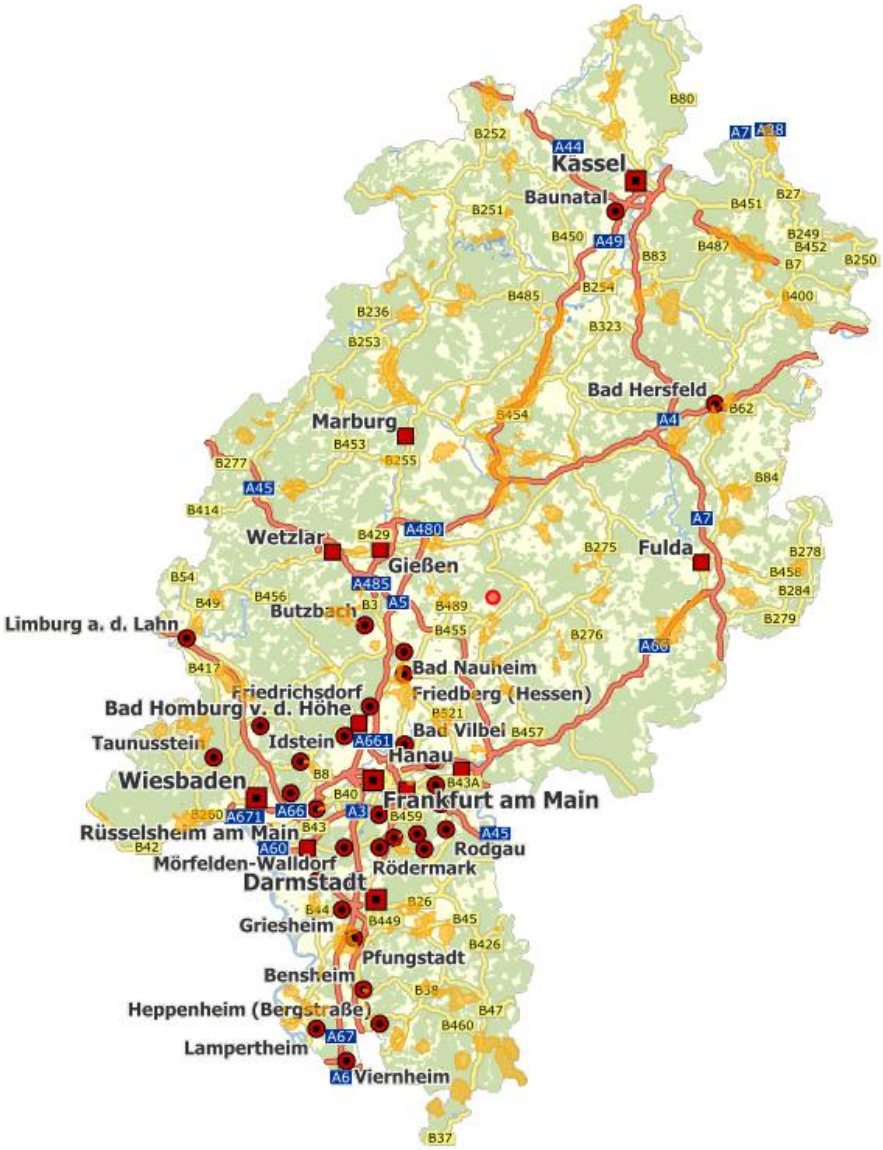


Abbildung 1: Orographische Übersichtskarte von Hessen (Quelle: Geoportal Hessen)

Die ausgeprägte Orographie Hessens hat einen wesentlichen Einfluss auf die räumliche Verteilung von Niederschlägen (vgl. Abbildung 2-1). Insbesondere in den Mittelgebirgsregionen kommt es durch orographische Hebung zu erhöhten Niederschlagsmengen, während in tiefer gelegenen Beckenräumen geringere Werte auftreten. Dadurch ergibt sich eine starke räumliche Differenzierung der Niederschlagsverhältnisse innerhalb des Bundeslandes (HLNUG, 2024).

2.2 Klimatische Rahmenbedingungen und Niederschlagsverteilung

Das Klima in Hessen ist dem gemäßigten mitteleuropäischen Klimabereich zuzuordnen und zeichnet sich durch eine ganzjährige Niederschlagsverteilung aus. Dennoch bestehen deutliche Unterschiede sowohl im Jahresverlauf als auch in der räumlichen Verteilung der Niederschläge.

Die mittleren Jahresniederschläge variieren räumlich erheblich und sind stark von der Topographie abhängig (vgl. Abbildung 2-2). Höhere Niederschlagsmengen treten insbesondere in den Mittelgebirgen auf, während in tiefer gelegenen Regionen geringere Werte gemessen werden.

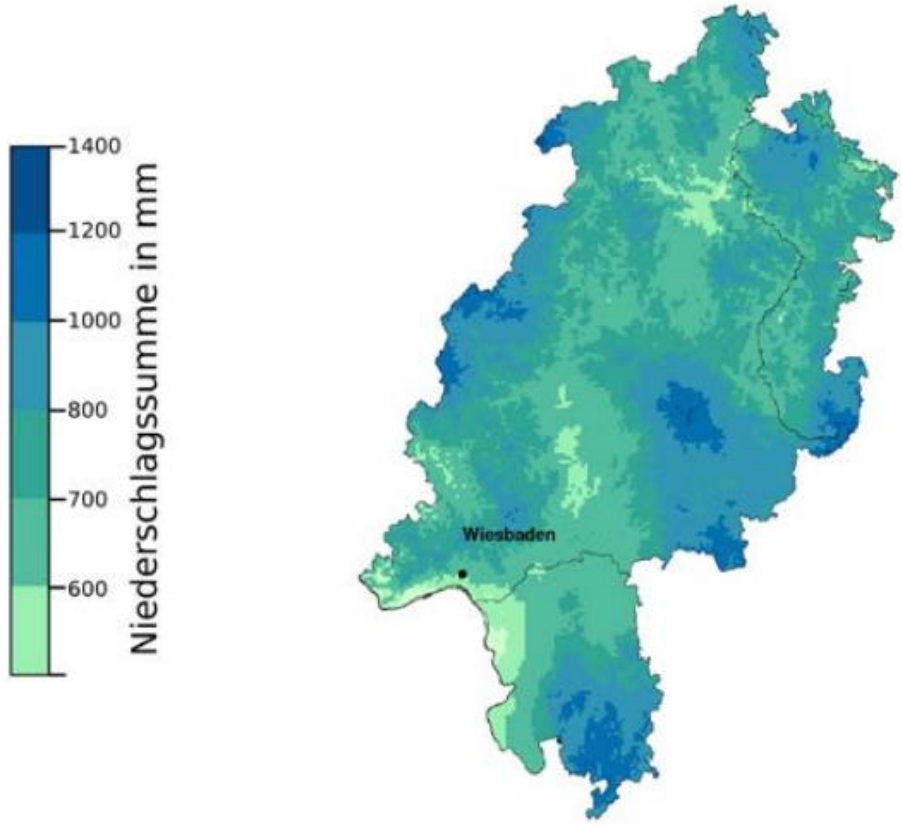


Abbildung 2: Mittlerer Jahresniederschlag in Hessen im Zeitraum 1991-2020 (Quelle: HLNUG, 2024)

Extreme Tagesniederschläge treten häufig im Zusammenhang mit konvektiven Ereignissen auf, die sich durch eine hohe räumliche und zeitliche Variabilität auszeichnen. Solche Ereignisse können lokal sehr hohe Niederschlagsmengen verursachen, während benachbarte Gebiete deutlich geringere Mengen erhalten. Diese kleinräumige Variabilität stellt eine besondere Herausforderung für die Analyse und Interpretation von Starkniederschlägen dar (HLNUG, 2024).

2.3 Messnetz und Datenverfügbarkeit

Die Analyse von Niederschlagsdaten über lange Zeiträume erfordert eine Betrachtung der Entwicklung des Messnetzes. In Hessen hat sich die Anzahl der verfügbaren Messstationen seit dem späten 19. Jahrhundert deutlich verändert.

In den frühen Zeiträumen war die Stationsdichte vergleichsweise gering, wodurch die räumliche Abdeckung der Messdaten eingeschränkt war. Mit dem Ausbau des Messnetzes im Laufe des 20. Jahrhunderts nahm die Anzahl der Stationen kontinuierlich zu, wodurch sich die Datengrundlage deutlich verbesserte. Ab der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts steht eine vergleichsweise dichte und flächendeckende Messinfrastruktur zur Verfügung.

Diese Entwicklung hat unmittelbare Auswirkungen auf die Vergleichbarkeit der Daten. Während frühe Zeiträume nur eingeschränkt belastbare Aussagen zulassen, ermöglichen spätere Zeiträume eine deutlich robustere Analyse. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass Veränderungen in der Messtechnik die Erfassung extremer Niederschlagsintensitäten beeinflussen können. Ältere Messsysteme weisen teilweise eine geringere Auflösung auf, wodurch hohe Intensitäten potenziell unterschätzt wurden (vgl. Willems et al., 2023).

2.4 Datengrundlage

Die Untersuchung basiert auf stationsbezogenen Niederschlagsdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Die verwendeten Datensätze umfassen tägliche Niederschlagssummen verschiedener Messstationen in Hessen und decken einen Zeitraum von 1870 bis 2024 ab.

Für jede Station und jedes Jahr wird die jeweils maximale tägliche Niederschlagssumme bestimmt. Diese Jahreshöchstwerte bilden die Grundlage für die weitere Analyse extremer Niederschlagsereignisse. Fehlende oder unvollständige Daten werden in der Auswertung berücksichtigt und entsprechend gekennzeichnet. Durch die lange Zeitreihe lassen sich sowohl natürliche Klimavariabilität als auch mögliche langfristige Veränderungen der Niederschlagsverhältnisse analysieren.

3. Methodik

Zur Untersuchung extremer Tagesniederschläge in Hessen wurde ein empirisch-analytischer, beobachtungsbasierter Ansatz gewählt. Im Mittelpunkt stand die Auswertung tatsächlich gemessener Stationsdaten über einen langen Zeitraum (1870–2024). Ziel der Untersuchung war es, Veränderungen in Intensität und Auftreten extremer Niederschlagsereignisse nachvollziehbar zu beschreiben und räumlich einzuordnen, ohne zusätzliche Annahmen einzuführen, die die Interpretation der Messdaten überlagern können. Der methodische Kern bestand daher in einer Kombination aus stationsweiser Zeitreihenanalyse und GIS-gestützter Raumanalyse (kartographische Visualisierung und räumliche Einordnung).

Der Ansatz war bewusst deskriptiv-analytisch angelegt. „Deskriptiv“ bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Untersuchung zunächst auf der strukturierten Darstellung und systematischen Beschreibung der beobachteten Extremwerte beruht (z. B. Jahresmaxima, Häufigkeiten nach Intensitätsklassen, zeitliche Vergleichsperioden). „Analytisch“ ist der Ansatz insofern, als die Daten darüber hinaus mit statistischen Verfahren untersucht werden, um Hinweise auf systematische Veränderungen (Trends und mögliche Bruchpunkte) zu gewinnen.

Diese Vorgehensweise erwies sich insbesondere für Extremniederschläge als geeignet, da Starkregenereignisse durch eine hohe natürliche Variabilität gekennzeichnet sind und räumlich wie zeitlich stark schwanken; der Nachweis robuster Veränderungen erforderte daher eine methodisch transparente und reproduzierbare Auswertung (IPCC, 2021; EEA, 2020).

Ein zentraler Bestandteil des Forschungsdesigns war die Fokussierung auf Extremindikatoren, insbesondere auf die maximale Tagesniederschlagssumme pro Jahr und Station. Damit wurde der ereignisbezogene Charakter von Starkregen abgebildet: Für Überflutungsprozesse und potenzielle Schadenswirkungen sind nicht primär Mittelwerte oder jahreszeitliche Summen ausschlaggebend, sondern kurze Ereignisse mit hoher Intensität. Die Analyse von Jahresmaxima erlaubte zudem einen konsistenten Vergleich über lange Zeiträume, auch wenn Stationsdichte und Datenverfügbarkeit historisch variierten.

Die Arbeit verzichtete bewusst auf modellbasierte Hochrechnungen (z. B. Projektionen künftiger Extremwerte) sowie auf flächendeckende statistische Interpolation von Punktmessungen. Dieser Verzicht war methodisch begründet: Ziel war nicht die Erstellung eines flächenhaften Niederschlagsfeldes oder eine Prognose zukünftiger Entwicklungen, sondern eine empirische Auswertung der tatsächlich beobachteten Messreihen.

Insbesondere bei Extremwerten kann eine Interpolation zu einer Glättung führen und damit lokale Spitzenwerte abschwächen. Ebenso hätte eine modellbasierte Projektion zusätzliche Unsicherheiten eingeführt und den Fokus von der historischen Beobachtung auf Annahmen über zukünftige Zustände verschoben. Durch die Konzentration auf Messdaten blieb die Aussagegrundlage klar nachvollziehbar und überprüfbar.

Die räumliche Komponente wurde mithilfe eines Geoinformationssystems (GIS) umgesetzt, um die stationsbasierten Ergebnisse in ihrem geographischen Kontext zu interpretieren. Karten dienten dabei nicht nur der Illustration, sondern auch als analytisches Werkzeug zur Identifikation räumlicher Muster (z. B. regionale Häufungen, Höhenlagenbezug) sowie zur Auswahl exemplarischer Jahre bzw. Stationen für vertiefende Betrachtungen. Der methodische Mehrwert dieser Kombination lag darin, dass zeitliche Kennwerte (Trends, Häufigkeiten, Extremjahre) und räumliche Informationen (Lage, topographischer Bezug, regionale Cluster) gemeinsam ausgewertet werden konnten.

Insgesamt war der gewählte Ansatz darauf ausgerichtet, die Forschungsfrage mit einer transparenten, reproduzierbaren und datenbasierten Methodik zu beantworten. Gleichzeitig wurde berücksichtigt, dass Extremniederschläge stark variieren und regionale Unterschiede ausgeprägt sind; die Untersuchung legte daher besonderen Wert auf die dokumentierte Einordnung von Unsicherheiten (z. B. Messnetzaufbau, Zeitreihenlängen) und eine vorsichtige Interpretation im Kontext des aktuellen Forschungsstands (IPCC, 2021; EEA, 2020).

3.1 Datenbasis und Datengrundlagen

Die Untersuchung stützte sich auf mehrere klar voneinander abgegrenzte Datengrundlagen: stationsbasierte Niederschlagsmessdaten als primäre empirische Basis, räumliche Referenzdaten zur Abgrenzung des Untersuchungsraums sowie hydrologische Zusatzdaten zur Einordnung potenzieller Abflusswege. Ergänzend wurden amtliche Fachberichte als Kontextquellen herangezogen, um die Ergebnisse in den Stand der angewandten Klimafolgen- und Starkregenforschung einzuordnen.

Als Primärdaten wurden tägliche Niederschlagssummen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) verwendet, die über das Climate Data Center (CDC) öffentlich bereitgestellt wurden. Das CDC stellt historische Stationsbeobachtungen für Deutschland bereit, darunter tägliche Niederschlagsdaten („daily climate observations“) einschließlich Stationsmetadaten und Datenbeschreibungen. Die Datenbasis umfasste den Zeitraum 1870 bis 2024 und lag stationsbasiert vor. Die zeitlich variierende Datenverfügbarkeit resultiert aus der historischen Entwicklung des Messnetzes, die in Kapitel 2.3 beschrieben wird.

Für die räumliche Abgrenzung des Untersuchungsgebiets wurden administrative Geodaten (Landesgrenze Hessen) verwendet, um die Stationen eindeutig dem Bundesland zuzuordnen und die Ergebnisse kartographisch konsistent darzustellen. Die Stationen wurden über ihre geografischen Koordinaten räumlich verortet und als Punktdaten verarbeitet. Dadurch wurde eine klare räumliche Bezugsebene geschaffen, die sowohl die Visualisierung als auch die Analyse räumlicher Muster (z. B. regionale Häufungen) ermöglichte. Die räumliche Verteilung der Messstationen ist in Abbildung 3-1 dargestellt.

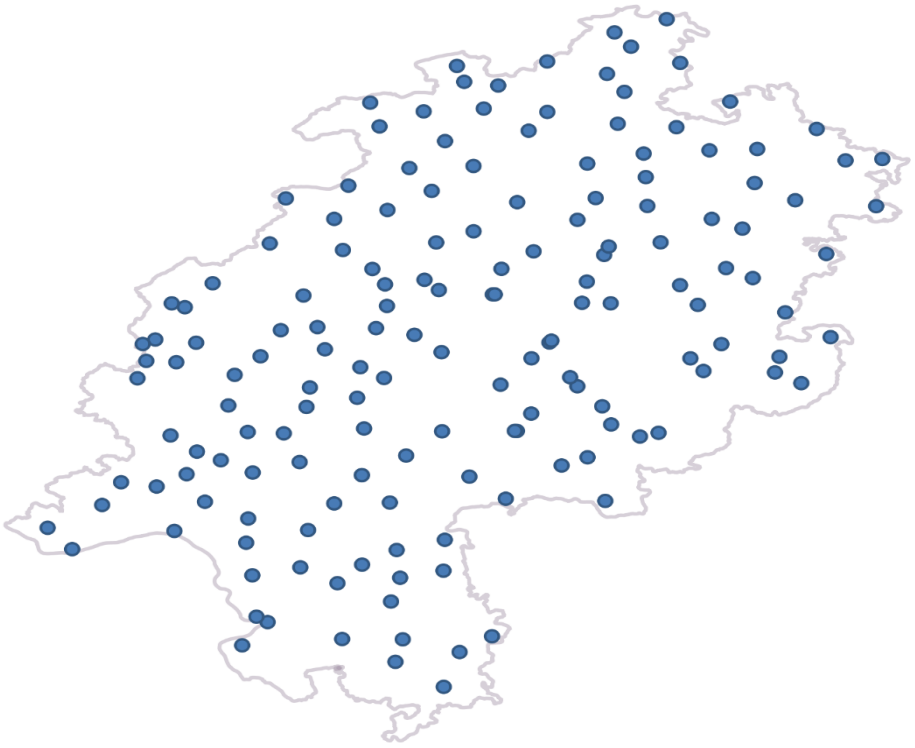


Abbildung 3: Räumliche Verteilung der Messstationen in Hessen (eigene Darstellung)

Zur hydrologischen Kontextualisierung wurden Fließpfadkarten und zugehörige Produkte aus dem hessischen Starkregen-Kontext herangezogen. Das Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) stellte hierfür den Starkregenviewer bereit, über den sowohl die Starkregen-Hinweiskarte als auch kommunale Fließpfadkarten zugänglich sind. Ergänzend lag eine erläuternde Dokumentation zur Dateninterpretation vor, in der die Aussagegrenzen dieser Karten (z. B. Maßstab, Auflösung, Funktion als erste Übersicht) beschrieben wurden.

Die Fließpfadkarten dienten in dieser Arbeit dazu, die klimatologische Betrachtung punktueller Extremniederschläge um eine raumbezogene Einordnung potenzieller Abflusswege zu ergänzen. Dabei wurde ausdrücklich berücksichtigt, dass Fließpfadkarten eine indikative Vorabschätzung darstellen und lokale Detailuntersuchungen (z. B. Starkregen-Gefahrenkarten) nicht ersetzen.

Als Kontext- und Einordnungsquellen wurden darüber hinaus amtliche Berichte genutzt, die den aktuellen Stand der Klimafolgenbeobachtung und -bewertung in Deutschland bzw. Hessen zusammenfassten. Hierzu zählte insbesondere der Monitoringbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (UBA), der klimatologischen Entwicklungen und Extremindikatoren im Rahmen eines Indikatorensystems dokumentiert.

Zur fachlichen Einordnung wurden ergänzend landesspezifische Berichte, insbesondere der Klimareport Hessen, herangezogen.

3.2 Definition der Zielgrößen und Analyseindikatoren

Zur Beantwortung der Forschungsfrage wurden extreme Tagesniederschläge in Hessen über mehrere komplementäre Indikatoren operationalisiert. Ziel war es, sowohl Veränderungen in der Intensität extremer Ereignisse als auch mögliche Änderungen in deren Auftretenshäufigkeit zu erfassen. Da Starkregenereignisse im Tagesmaßstab eine hohe Variabilität aufweisen und einzelne Jahre die Wahrnehmung stark prägen können, war eine methodisch klare und einheitliche Definition der verwendeten Zielgrößen erforderlich. Die hier verwendeten Indikatoren wurden so gewählt, dass sie direkt aus den Stationsmessdaten ableitbar waren und eine reproduzierbare Auswertung über den gesamten Zeitraum 1870–2024 ermöglichten.

Als zentrale Zielgröße der Untersuchung wurde für jede Station die maximale Tagesniederschlagssumme pro Kalenderjahr bestimmt (Jahresmaximum der Tageswerte). Dieser Indikator bildete den ereignisbezogenen Charakter von Starkregen ab, da er den jeweils intensivsten Niederschlagstag eines Jahres erfasste. Die Jahresmaxima erwiesen sich für die Bewertung extremer Niederschläge als besonders geeignet, da sie unabhängig von der Anzahl der Niederschlagstage waren und den Fokus auf potenziell schadensrelevante Ereignisse legten.

Damit wurde die Analyse bewusst von Mittelwerten sowie von Monats- oder Jahresniederschlagssummen abgegrenzt, die zwar klimatologische Hintergrundbedingungen beschrieben, Starkniederschlagsereignisse jedoch häufig nur indirekt widerspiegelten.

Die Wahl des Jahresmaximums bot zudem praktische Vorteile für die Vergleichbarkeit: Pro Jahr und Station lag genau ein Wert vor, wodurch Zeitreihen unterschiedlicher Länge leichter gegenübergestellt werden konnten. Gleichzeitig wurde die Datenmenge reduziert, ohne den Kern der Fragestellung – die Entwicklung extremer Tagesereignisse – zu verlieren. Dieser Schritt stellte somit eine inhaltlich begründete Aggregation dar, die den Fokus der Arbeit konsequent auf Extremwerte ausrichtete.

Ergänzend zur Analyse der Jahresmaxima wurde eine Ereignishäufigkeitsanalyse durchgeführt, um Veränderungen in der Häufigkeit von Starkregenereignissen in definierten Intensitätsbereichen abzubilden. Die Berechnung erfolgte programmatisch in Python innerhalb der Entwicklungsumgebung Thonny auf Basis des zuvor erzeugten stationsbezogenen Analysedatensatzes.

Hierfür wurden die Jahresmaxima algorithmisch nach fest definierten Schwellenwerten gefiltert und in Intensitätsklassen eingeteilt, die sich an praxisnahen Grenzwerten orientierten. Konkret wurden Schwellenwerte verwendet, die in der Starkregenkommunikation und der wasserwirtschaftlichen Praxis häufig als relevant betrachtet werden (z. B. ≥ 50 mm/Tag, ≥ 60 mm/Tag bis ≥ 100 mm/Tag). Die Klassenzuordnung erfolgte automatisiert für alle Stationen nach identischem Schema, sodass eine einheitliche und reproduzierbare Aggregation gewährleistet war.

Anschließend wurden die klassifizierten Ereignisse zeitlich aggregiert (z. B. Vergleich vor und nach 1980 bzw. 1985). Die Ergebnisse wurden tabellarisch zusammengeführt und für die weitere Auswertung sowie zur Erstellung der Abbildungen in ein Excel-Format exportiert, wobei die Berechnung und Klassifizierung vollständig in Python erfolgte.

Durch diese Vorgehensweise konnten nicht nur absolute Extremspitzen, sondern auch mögliche Verschiebungen hin zu häufiger auftretenden „sehr starken“ Ereignissen systematisch erfasst werden, ohne dass eine komplexe Extremwertmodellierung erforderlich war. Gleichzeitig blieb der gesamte Auswertungsschritt reproduzierbar und transparent dokumentiert.

Zur Untersuchung potenzieller zeitlicher Veränderungen wurde die Ereignishäufigkeit zusätzlich nach Vergleichsperioden ausgewertet. Als heuristische zeitliche Trennlinie wurde der Vergleich vor und nach 1980 herangezogen. Die Wahl dieser Periodisierung diente der strukturierten Auswertung und ermöglichte es, Veränderungen im Auftreten extremer Ereignisse zwischen einem früheren Referenzzeitraum und einer jüngeren Periode systematisch zu vergleichen. Diese Vorgehensweise erwies sich insbesondere vor dem Hintergrund stark variierender Datenverfügbarkeit über lange Zeiträume als zweckmäßig und entsprach der in der Literatur häufigen Fokussierung auf jüngere Dekaden (z. B. IPCC, 2021; UBA, 2023). Die Periodisierung wurde dabei nicht als Nachweis eines klimatischen Wendepunktes interpretiert, sondern als methodische Hilfskonstruktion zur übersichtlichen und nachvollziehbaren Ergebnisdarstellung verstanden.

Neben den eigentlichen Extrem- und Häufigkeitsindikatoren wurden stationsbezogene Kennwerte dokumentiert, die für die Interpretation der Ergebnisse unerlässlich waren. Dazu zählten insbesondere der Messzeitraum je Station, die Länge der Zeitreihe sowie der Umfang fehlender Messjahre. Diese Größen waren methodisch relevant, da die Aussagekraft trendbezogener Auswertungen wesentlich von der Verfügbarkeit und Dauer der Zeitreihen abhängt. Zeitreihen mit kurzer Laufzeit oder zahlreichen Datenlücken können zwar für eine deskriptive Darstellung herangezogen werden, besitzen jedoch eine eingeschränkte Eignung für belastbare Aussagen über langfristige Veränderungen. Deshalb wurden diese Metaindikatoren als Bestandteil der Datendokumentation geführt und bei der Bewertung der Trend- und Bruchpunktanalysen berücksichtigt.

Insgesamt entstand durch die Kombination aus Jahresmaxima als Intensitätsindikator, Häufigkeiten oberhalb definierter Schwellenwerte sowie transparent dokumentierten stationsbezogenen Zeitreihenkennwerten ein mehrdimensionales Indikatorenset. Dieses war geeignet, die Forschungsfrage sowohl hinsichtlich der Entwicklung extremer Tagesniederschläge als auch hinsichtlich möglicher zeitlicher und räumlicher Muster zu bearbeiten, ohne zusätzliche Annahmen durch Interpolation oder Modellprojektionen einzuführen.

3.3 Datenaufbereitung und Vorverarbeitung (Python/Thonny)

Die stationsbasierten Niederschlagsdaten lagen in ihrer Rohform als tägliche Messwerte vor und waren damit für die Beantwortung der Forschungsfrage zunächst nur eingeschränkt geeignet. Um die Entwicklung extremer Tagesniederschläge über den Zeitraum 1870–2024 vergleichbar untersuchen zu können, war eine systematische Datenaufbereitung erforderlich. Dieser Schritt umfasste die Harmonisierung der Datenstruktur, die Ableitung der untersuchten Zielgröße (Jahresmaximum) sowie die Sicherstellung einer konsistenten räumlichen Zuordnung der Messstationen. Die Datenaufbereitung wurde mithilfe von Python in der Entwicklungsumgebung Thonny umgesetzt und erzeugte einen einheitlichen, analysefähigen Datensatz als Grundlage für die anschließenden statistischen Auswertungen und die GIS-basierte Visualisierung.

Ausgangspunkt der Verarbeitung waren die täglichen Niederschlagssummen je Station. In einem ersten Schritt wurden die Rohdaten eingelesen und in eine konsistente Tabellenstruktur überführt, sodass eine eindeutige Zuordnung jedes Messwertes zu Station und Datum gewährleistet war. Das Datum wurde auf Kalenderjahre abgebildet, da die zentrale Zielgröße der Arbeit jährlich definiert war. Anschließend erfolgte die Ableitung der Jahresmaxima: Für jede Station und jedes Kalenderjahr wurde die höchste tägliche Niederschlagssumme bestimmt und als Jahresmaximum gespeichert. Durch diese Aggregation wurde das Datenvolumen erheblich reduziert, während die für die Fragestellung relevante Information – die Intensität extremer Tagesereignisse – erhalten blieb. Die Jahresmaxima bildeten die Grundlage sowohl für die späteren Trend- und Bruchpunktanalysen als auch für die kartographische Darstellung im Jahresatlas.

Ein zentraler Aspekt der Datenaufbereitung betraf die historisch variierende Datenverfügbarkeit. Das Messnetz war im Untersuchungszeitraum nicht konstant, sondern entwickelte sich schrittweise. In frühen Jahrzehnten existierten nur wenige Stationen; später nahm die Stationsdichte deutlich zu. Zudem wiesen einzelne Stationen unterbrochene Messreihen auf, etwa infolge von Betriebsunterbrechungen oder fehlenden Aufzeichnungen.

Um eine einheitliche zeitliche Struktur für alle Stationen zu erzeugen, wurde für jede Station eine vollständige Jahresliste für den Zeitraum 1870–2024 angelegt. Jahre, in denen für eine Station keine Messungen vorlagen, wurden in der Zeitreihe technisch mit dem Wert 0 codiert. Diese Codierung diente ausschließlich dazu, die Zeitreihen strukturell zu vervollständigen und eine konsistente Weiterverarbeitung zu ermöglichen (z. B. für Exportformate, Atlas-Steuerung oder vollständige Zeitachsen in Tabellen). Methodisch war dabei entscheidend, dass der Wert 0 in diesem Kontext nicht als meteorologisch gemessene Niederschlagshöhe interpretiert wurde, sondern als Kennzeichnung eines Jahres ohne Messaktivität bzw. ohne verfügbare Daten. Auf diese Weise wurde transparent abgebildet, dass bestimmte Stationen in den frühen Jahrzehnten noch nicht betrieben wurden oder zeitweise keine vollständigen Aufzeichnungen vorlagen. Diese Entscheidung wurde in der späteren Interpretation ausdrücklich berücksichtigt, indem die zeitlich stark variierende Stationsdichte sowie die Länge der verfügbaren Zeitreihen dokumentiert und als Einschränkung der Aussagekraft insbesondere für frühe Perioden diskutiert wurden.

Zur Ermöglichung einer räumlichen Analyse wurden die Jahresmaxima eindeutig georeferenziert. Im Rahmen der Datenaufbereitung wurde sichergestellt, dass jede Station mit geographischen Koordinaten (Breite/Länge) verknüpft war. Die Koordinaten wurden gemeinsam mit den abgeleiteten Jahresmaxima in den finalen Datensatz übernommen, sodass jeder Jahreswert räumlich eindeutig positionierbar war. Dies bildete die Voraussetzung für die GIS-gestützte Visualisierung und für räumliche Musteranalysen (z. B. regionale Häufungen von Extremwerten oder Trendstationen).

Neben der Ableitung der Analysewerte wurde die Datenaufbereitung genutzt, um grundlegende Konsistenz zu sichern. Dazu gehörten insbesondere die Vermeidung doppelter Datensätze (z. B. doppelte Station-Jahr-Kombinationen), die Prüfung plausibler Wertebereiche sowie die Sicherstellung, dass die Jahresmaxima tatsächlich aus den Tageswerten abgeleitet wurden und nicht aus bereits aggregierten Zwischenständen stammten. Solche Plausibilitätsprüfungen waren insbesondere bei langen Zeitreihen relevant, da einzelne Fehlwerte oder Formatierungsprobleme (z. B. Dezimaltrennzeichen oder Datumsinterpretation) andernfalls zu fehlerhaften Extremwerten hätten führen können.

Als Ergebnis der Vorverarbeitung entstand ein standardisierter, stationsbasierter Analysedatensatz, der pro Station und Jahr genau einen Wert (Jahresmaximum) enthielt und zusätzlich die räumliche Verortung ermöglichte. Dieser Datensatz wurde in ein Austauschformat (z. B. CSV) exportiert, das sowohl für statistische Auswertungen als auch für den Import in QGIS geeignet war.

Die Datenaufbereitung bildete damit die zentrale Brücke zwischen Rohdaten und anschließender Auswertung. Sie gewährleistete Vergleichbarkeit, Reproduzierbarkeit und Transparenz hinsichtlich Datenlücken und historischer Entwicklung des Messnetzes.

3.4 GIS-gestützte Verarbeitung und Visualisierung (QGIS)

Die räumliche Verarbeitung, Analyse und Darstellung der stationsbasierten Extremniederschläge erfolgte mithilfe des Geoinformationssystems QGIS. Ziel der GIS-gestützten Arbeitsschritte war es, die zeitlich abgeleiteten Extremwerte (Jahresmaxima) in ihrem geographischen Kontext zu verorten, räumliche Muster sichtbar zu machen und eine konsistente Grundlage für die Auswahl exemplarischer Karten und Stationen zu schaffen. Während die Zeitreihenanalyse die Entwicklung pro Station abbildete, ermöglichte das GIS eine räumliche Perspektive auf das Auftreten extremer Ereignisse, die für Hessen aufgrund der ausgeprägten topographischen und klimatischen Heterogenität besonders relevant war.

Ausgangspunkt der GIS-Verarbeitung war der in der Datenaufbereitung erzeugte Analysedatensatz, der pro Station und Jahr das Jahresmaximum der täglichen Niederschlagssumme sowie die geografischen Koordinaten enthielt. Dieser Datensatz wurde in QGIS als Punktlayer importiert und über die Koordinaten räumlich verortet. Zur eindeutigen Definition des Untersuchungsraums und zur Sicherstellung einer konsistenten Kartenlage wurde zusätzlich ein Referenzlayer der administrativen Landesgrenze Hessens eingebunden. Die Landesgrenze diente dabei als visuelle und analytische Bezugsfläche: Sie ermöglichte eine klare Abgrenzung der räumlichen Darstellung, unterstützte die Einordnung regionaler Muster und reduzierte Interpretationsunsicherheiten, die entstanden wären, wenn Stationen außerhalb Hessens in die Visualisierung eingeflossen wären.

Für die kartographische Darstellung der Jahresmaxima wurde eine regel- bzw. klassifikationsbasierte Symbolisierung eingesetzt. Die Extremwerte wurden in Intensitätsstufen eingeteilt, um Unterschiede im räumlichen Auftreten und in der Intensität extremer Tagesereignisse nachvollziehbar darzustellen. Die Klassifikation basierte auf fest definierten Schwellenwerten und ermöglichte eine visuell konsistente Interpretation über den gesamten Untersuchungszeitraum. Dadurch wurde ein methodischer Rahmen geschaffen, der die Vergleichbarkeit zwischen Jahren und zwischen Regionen sicherstellte: Ein Wert in einer bestimmten Intensitätsklasse bedeutete in jeder Karte dasselbe und konnte unabhängig von der jeweiligen Stationsdichte interpretiert werden. Gleichzeitig erlaubte die Klassifikation, außergewöhnlich hohe Ereignisse deutlich zu markieren und Jahre mit besonders extremen Spitzen erkennbar zu machen.

Ein zentraler Baustein der GIS-Methodik war die Erstellung eines automatisierten Atlas-Workflows. Aufgrund des langen Untersuchungszeitraums (1870–2024) konnten für jedes Jahr eigenständige Karten generiert werden, in denen die räumliche Verteilung der jeweiligen Jahresmaxima sichtbar wurde.

Der Atlas ermöglichte eine systematische und reproduzierbare Visualisierung der zeitlichen Entwicklung: Karten wurden in gleichbleibendem Layout, Maßstab und Legendenkonzept erzeugt, sodass Unterschiede zwischen Jahren nicht durch kartographische Variationen, sondern durch die Daten selbst bedingt waren. Methodisch diente der Atlas in dieser Arbeit primär als Analyseinstrument, um räumliche Muster über die Zeit zu erkennen und Vergleichsjahre zu identifizieren.

Da ein vollständiger Abdruck aller Jahreskarten im Rahmen einer Masterarbeit weder praktikabel noch zweckmäßig war, wurde für die Ergebnisdarstellung ein Auswahlprinzip angewendet. Statt sämtliche Karten abzubilden, wurden exemplarische Jahre ausgewählt, die entweder durch besonders hohe Extremwerte, eine auffällige räumliche Häufung intensiver Ereignisse oder durch einen erkennbaren Kontrast zwischen Zeitabschnitten gekennzeichnet waren.

Diese Auswahlstrategie trug der wissenschaftlichen Zielsetzung Rechnung, zentrale Muster und Entwicklungen prägnant darzustellen, ohne den Leser mit einer vollständigen Kartenserie zu überfrachten. Gleichzeitig blieb die vollständige Atlas-Serie als Hintergrundmaterial erhalten und diente als Grundlage, um die Auswahl nachvollziehbar zu begründen.

Im Rahmen der GIS-Verarbeitung wurde zudem transparent mit Datenlücken umgegangen. Jahre ohne Messaktivität einzelner Stationen waren im Datensatz strukturell enthalten und wurden entsprechend der gewählten Codierung (0 = keine Messung) in der Kartenlogik kenntlich behandelt. Methodisch war dabei entscheidend, dass solche Werte nicht als tatsächliche Niederschlagsereignisse interpretiert wurden, sondern die Historie des Messnetzes abbildeten.

In der kartographischen Darstellung wurden daher Darstellungsregeln so gestaltet, dass Datenlücken nicht fälschlich als „niedriger Niederschlag“ missverstanden werden konnten. Dies war insbesondere für frühe Zeitabschnitte relevant, in denen die Stationsdichte gering war und räumliche Muster nur eingeschränkt interpretiert werden konnten. Die GIS-Visualisierung unterstützte damit nicht nur die Darstellung von Extremwerten, sondern auch die Dokumentation der Datenbasis und ihrer zeitlichen Entwicklung.

Zusammenfassend fungierte QGIS in dieser Arbeit als methodische Schnittstelle zwischen stationsbasierten Zeitreihen und räumlicher Interpretation. Durch den Import der Extremwerte als Punktlayer, die Einbindung einer klaren räumlichen Referenz (Landesgrenze Hessen), die konsistente Klassifikation nach Intensitätsstufen sowie den Atlas-Workflow zur jährlichen Darstellung entstand ein reproduzierbares GIS-Setup. Dieses Setup ermöglichte die Identifikation und Kommunikation räumlicher Muster extremer Niederschläge und bildete zugleich die Grundlage für die Auswahl aussagekräftiger Abbildungen im Ergebnisteil.

3.5 Trendanalyse (stationsbasiert)

Zur quantitativen Bewertung langfristiger Veränderungen extremer Tagesniederschläge wurde eine Trendanalyse auf Basis der stationsweisen Jahresmaxima durchgeführt. Ziel war es zu prüfen, ob sich in den Zeitreihen der maximalen Tagesniederschlagssummen systematische Entwicklungen über den Zeitraum 1870–2024 erkennen ließen, die über kurzfristige Schwankungen hinausgingen. Da Extremniederschläge eine hohe natürliche Variabilität aufweisen und einzelne sehr starke Ereignisse einzelne Jahre dominieren können, erfolgte die Auswertung konsequent stationsbezogen und nicht aggregiert über das gesamte Bundesland. Auf diese Weise blieb die räumliche Heterogenität Hessens erhalten, und lokale Unterschiede konnten methodisch nachvollziehbar abgebildet werden.

Die Trendanalyse basierte auf dem Mann-Kendall-Trendtest. Für jede Station wurde eine Zeitreihe erstellt, deren Werte die Intensität des jeweils stärksten Tagesniederschlags eines Jahres darstellten. Auf dieser Grundlage wurde je Station geprüft, ob die Jahresmaxima im Verlauf der Zeit eine gerichtete Veränderung aufwiesen. Die Trendprüfung erfolgte mit einem robusten, für klimatologische Zeitreihen geeigneten Verfahren, das keine strengen Verteilungsannahmen erforderte und daher auch bei schief verteilten und ausreißeranfälligen Extremwertreihen anwendbar war. Die statistische Bewertung erfolgte über ein Signifikanzniveau von $p < 0{,}05$, um zwischen zufälligen Schwankungen und statistisch abgesicherten Trendhinweisen zu unterscheiden.

Für die Interpretation der Trendanalyse war der Umgang mit Messnetzaufbau und Datenlücken zentral. Da das Stationsnetz historisch gewachsen ist und nicht für alle Stationen durchgehend Messwerte über den gesamten Zeitraum vorlagen, wurden Zeitreihenlänge und Datenverfügbarkeit systematisch dokumentiert. Jahre ohne Messaktivität waren im Datensatz strukturell enthalten (Codierung als 0), wurden im Rahmen der Trendanalyse jedoch nicht als meteorologische Niederschlagswerte interpretiert. Für die trendbezogene Auswertung wurden ausschließlich jene Jahre berücksichtigt, in denen für die jeweilige Station tatsächlich Messwerte vorlagen.

Dadurch wurde verhindert, dass nicht gemessene Jahre die Trendrichtung oder Trendstärke künstlich beeinflussten. Gleichzeitig blieb die vollständige Zeitstruktur für Visualisierung und Dokumentation erhalten.

Die Ergebnisse der Trendanalyse wurden in einer Übersichtstabelle zusammengeführt. Für jede Station wurde festgehalten, ob ein statistisch abgesicherter Trend vorlag und – falls zutreffend – in welcher Richtung (zunehmend oder abnehmend). Zusätzlich wurden der Messzeitraum (Start- und Endjahr), die Länge der Zeitreihe (Anzahl der Jahre mit verfügbaren Messdaten) sowie weitere für die Bewertung relevante Metainformationen dokumentiert. Diese strukturierte Zusammenstellung diente einerseits der transparenten Ergebnisdarstellung und bildete andererseits die Grundlage für die anschließende räumliche Einordnung (z. B. Kartierung signifikanter Trendstationen und Identifikation regionaler Häufungen).

Ein wichtiger methodischer Bestandteil war die Bewertung der Aussagekraft in Abhängigkeit von der Zeitreihenlänge. Extremniederschläge variieren stark, weshalb kurze Reihen häufig keine belastbaren Aussagen über langfristige klimatische Veränderungen zulassen. Zeitreihen mit einer Länge unterhalb von etwa 30 bis 50 Jahren wurden daher als klimatologisch eingeschränkt interpretierbar eingestuft. In solchen Fällen wurden Trendhinweise zwar dokumentiert, jedoch zurückhaltend bewertet und im Kontext der natürlichen Variabilität eingeordnet. Diese Vorgehensweise reduzierte das Risiko, aus kurzen oder lückenhaften Reihen überzogene Schlussfolgerungen abzuleiten.

Darüber hinaus wurden Stationen ohne nachweisbaren Trend ausdrücklich als informativer Bestandteil der Analyse verstanden. Das Ausbleiben eines signifikanten Trends konnte darauf hinweisen, dass keine gerichtete Veränderung der Jahresmaxima vorlag, dass die natürliche Variabilität eine Trenddetektion überlagerte oder dass die Datenlage (z. B. kurze Zeitreihe) eine eindeutige Bewertung nicht zuließ. Somit trugen sowohl Trendstationen als auch Stationen ohne Trend zur Gesamtinterpretation bei, indem sie die räumliche Differenziertheit und Variabilität extremer Niederschläge im Untersuchungsgebiet sichtbar machten.

Insgesamt stellte die Trendanalyse ein zentrales methodisches Element dar, das die visuelle GIS-Auswertung um eine statistisch gestützte Bewertung ergänzte. Während Karten räumliche Muster und auffällige Jahre sichtbar machten, lieferte die stationsweise Trendprüfung eine standardisierte Grundlage, um langfristige Veränderungen in den Extremwertreihen konsistent zu identifizieren und anschließend räumlich zu interpretieren.

3.6 Bruchpunktanalyse (stationsbasiert)

Ergänzend zur Trendanalyse wurde eine Bruchpunktanalyse durchgeführt, um mögliche strukturelle Änderungen innerhalb der Zeitreihen der maximalen Tagesniederschlagssummen zu identifizieren. Während die Trendanalyse auf langfristige, kontinuierliche Veränderungen abzielte, diente die Bruchpunktanalyse dazu, sprunghafte Veränderungen im zeitlichen Verlauf zu erkennen, beispielsweise einen abrupten Anstieg oder Rückgang des Extremniveaus. Solche Brüche konnten auf Veränderungen klimatischer Rahmenbedingungen hinweisen, jedoch ebenso auf andere Einflüsse, etwa Änderungen im Messnetz oder Phasen außergewöhnlich hoher Variabilität.

Die Bruchpunktanalyse erfolgte – analog zur Trendanalyse – stationsweise auf Basis der Zeitreihen der Jahresmaxima. Für jede Station wurde geprüft, ob innerhalb der Zeitreihe ein Zeitpunkt identifizierbar war, an dem sich die statistischen Eigenschaften der Extremwerte signifikant veränderten. Dabei wurde bewusst auf eine landesweite Aggregation verzichtet, um lokale Besonderheiten nicht zu überdecken und die ausgeprägte räumliche Heterogenität des Untersuchungsgebiets methodisch zu berücksichtigen.

Um eine Überinterpretation stark variabler Extremwertreihen zu vermeiden, wurde die Bruchpunktanalyse methodisch klar begrenzt. Pro Station wurde maximal ein Bruchpunkt zugelassen. Diese Einschränkung war fachlich begründet, da Extremniederschläge naturgemäß hohe Schwankungen aufweisen und die rechnerische Identifikation mehrerer Bruchpunkte innerhalb einer einzelnen Zeitreihe häufig eher zufällige Variabilität als eine systematische Strukturänderung widerspiegelte. Ziel war es daher nicht, sämtliche potenziellen Strukturveränderungen zu erfassen, sondern ausschließlich dominante und statistisch belastbare Veränderungen zu identifizieren.

Traten bei einer Station rechnerisch mehrere potenzielle Bruchpunkte auf, wurde dies nicht als Hinweis auf mehrere realen Strukturänderungen interpretiert, sondern als Indikator für eine besonders hohe zeitliche Variabilität der Extremwerte gewertet. In solchen Fällen wurde die Station entsprechend gekennzeichnet und in der Ergebnisdarstellung explizit als „keine eindeutige Bruchstruktur“ dokumentiert. Ebenso wurde das vollständige Ausbleiben identifizierbarer Bruchpunkte als relevantes Ergebnis verstanden, da dies auf eine vergleichsweise stabile Extremwertstruktur oder auf das Fehlen abrupt einsetzender Veränderungen hinweisen konnte.

Auch bei der Bruchpunktanalyse wurde die Länge der verfügbaren Zeitreihen systematisch in die Bewertung einbezogen. Zeitreihen mit kurzer Laufzeit oder hohem Anteil fehlender Messjahre besaßen eine eingeschränkte Aussagekraft hinsichtlich der Identifikation belastbarer Bruchpunkte. Entsprechend wurden Bruchpunktbefunde aus kurzen Reihen mit besonderer Zurückhaltung interpretiert und im Kontext der natürlichen Variabilität extremer Niederschläge eingeordnet. Diese Vorgehensweise stellte sicher, dass identifizierte Brüche nicht vorschnell als klimatisch bedingte Veränderungen gedeutet wurden.

Die Ergebnisse der Bruchpunktanalyse wurden strukturiert dokumentiert. Für jede Station wurde festgehalten, ob ein Bruchpunkt identifiziert wurde, in welchem Jahr dieser lag und wie der Befund im Hinblick auf die Stabilität oder Variabilität der Zeitreihe zu bewerten war. Diese Informationen wurden gemeinsam mit den Ergebnissen der Trendanalyse tabellarisch zusammengeführt und bildeten eine zentrale Grundlage für die anschließende räumliche Einordnung sowie für die Diskussion der Ergebnisse.

Durch die Kombination von Trend- und Bruchpunktanalyse wurde es möglich, unterschiedliche Typen zeitlicher Veränderungen zu unterscheiden – etwa kontinuierliche Entwicklungen gegenüber abrupten Strukturänderungen – und diese differenziert im Kontext des Starkregengeschehens in Hessen zu bewerten.

3.7 Räumliche Einordnung und hydrologischer Bezug (Fließpfadkarten)

Ein zentraler Bestandteil der räumlichen Einordnung war der hydrologische Bezug über Fließpfadkarten. Für ausgewählte Stationen mit identifizierten Trends wurde analysiert, in welchem hydrologischen Kontext sie lagen und über welche Fließpfade das Niederschlagswasser bei extremen Ereignissen potenziell abgeleitet werden könnte. Die im Rahmen des hessischen Starkregenmanagements bereitgestellten Fließpfadkarten zeigten modellhaft bevorzugte Abflusswege bei Starkregenereignissen und ermöglichten eine erste qualitative Einschätzung potenziell betroffener Bereiche.

Die Einbindung der Fließpfadkarten diente nicht der detaillierten Gefahrenanalyse auf Gebäude- oder Parzellenebene, sondern der qualitativen Einordnung der klimatologischen Ergebnisse. Durch die Verknüpfung von Trendstationen mit den zugehörigen Abflussstrukturen konnte nachvollzogen werden, ob Regionen mit auffälligen Entwicklungen extremer Niederschläge zugleich hydrologisch sensibel waren, beispielsweise durch steile Hanglagen, konzentrierte Abflussbahnen oder die Nähe zu Siedlungsflächen. Auf diese Weise wurde die rein klimatologische Analyse um eine raumbezogene Perspektive erweitert, die insbesondere für Fragestellungen der Klimafolgenabschätzung und der kommunalen Vorsorge relevant war.

Für Stationen oder Regionen, für die keine Fließpfadkarten vorlagen, wurde dies explizit dokumentiert. Das Fehlen entsprechender Karten wurde als relevante Information gewertet, da es auf bestehende Datenlücken im Bereich der Starkregenvorsorge hinwies. Diese Lücken wurden nicht durch Annahmen oder Ersatzdaten geschlossen, sondern transparent benannt und bei der Interpretation berücksichtigt. Dadurch blieb die Analyse nachvollziehbar und vermied eine Überdehnung der Aussagekraft der verwendeten Datengrundlagen.

Zusammenfassend trug die räumliche und hydrologische Einordnung dazu bei, die Ergebnisse der Trend- und Bruchpunktanalysen in einen funktionalen Kontext zu stellen. Die Kombination aus stationsbasierter Zeitreihenanalyse, GIS-gestützter Kartographie und Fließpfadbewertung ermöglichte es, potenzielle Zusammenhänge zwischen der Entwicklung extremer Niederschläge und der räumlichen Abflussdynamik aufzuzeigen, ohne den Anspruch einer detaillierten Risikoabschätzung zu erheben. Dieser methodische Schritt bildete die Brücke zwischen klimatologischer Analyse und anwendungsbezogener Fragestellung im Bereich der Starkregenvorsorge.

3.8 Methodische Grenzen und Unsicherheiten

Die in dieser Arbeit angewandte Methodik ermöglichte eine detaillierte empirische Analyse extremer Tagesniederschläge auf Basis historischer Stationsmessungen. Gleichzeitig unterlag der gewählte Ansatz – wie jede beobachtungsbasierte Untersuchung – bestimmten methodischen Grenzen und Unsicherheiten, die bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden mussten.

Eine zentrale Einschränkung ergab sich aus der historisch gewachsenen Struktur des Messnetzes. Insbesondere in den frühen Jahrzehnten des Untersuchungszeitraums war die Anzahl aktiver Messstationen gering, während sich die Stationsdichte im Verlauf des 20. Jahrhunderts deutlich erhöhte. Dadurch variierte die räumliche Abdeckung der Daten stark über die Zeit. Frühere Zeitabschnitte erlaubten daher nur eingeschränkte Aussagen über räumliche Muster extremer Niederschläge, während spätere Perioden eine dichtere und differenziertere Betrachtung ermöglichten. Diese Entwicklung des Messnetzes stellte keinen methodischen Fehler dar, sondern war eine inhärente Eigenschaft historischer Klimadaten, die in der Auswertung transparent berücksichtigt wurde.

Eng damit verbunden war die unterschiedliche Länge der Zeitreihen einzelner Stationen. Nicht alle Stationen verfügten über durchgängige Messungen über den gesamten Zeitraum von 1870 bis 2024. Zeitreihen mit kurzer Laufzeit oder mit einem hohen Anteil fehlender Messjahre besaßen eine eingeschränkte Aussagekraft im Hinblick auf langfristige klimatische Veränderungen. Insbesondere für Trend- und Bruchpunktanalysen galt, dass Zeiträume unterhalb von etwa 30 bis 50 Jahren primär natürliche Variabilität widerspiegelten und nur begrenzt als klimatologisch signifikant interpretiert werden konnten. Entsprechend wurden Zeitreihenlängen systematisch dokumentiert und bei der Bewertung der Ergebnisse explizit berücksichtigt.

Eine weitere methodische Besonderheit betraf den Umgang mit fehlenden Messjahren. Jahre ohne verfügbare Messdaten wurden in der Datenstruktur als 0 codiert, um eine vollständige zeitliche Darstellung zu gewährleisten.

Diese Codierung diente ausschließlich der strukturellen Vollständigkeit der Zeitreihen und war nicht als meteorologisch gemessene Niederschlagsmenge zu interpretieren. Für statistische Auswertungen wurden ausschließlich tatsächlich gemessene Werte berücksichtigt, sodass nicht gemessene Jahre die Trend- oder Bruchpunktanalyse nicht verfälschten. Gleichwohl konnte diese Darstellungsweise insbesondere bei rein visueller Betrachtung früher Zeitabschnitte zu einer scheinbaren Häufung niedriger Werte führen, weshalb entsprechende Karten mit methodischer Vorsicht interpretiert wurden.

Grundsätzlich war zu berücksichtigen, dass extreme Tagesniederschläge eine sehr hohe natürliche Variabilität aufweisen. Einzelne außergewöhnliche Ereignisse konnten die Jahresmaxima dominieren und zeitweise den Eindruck abrupter Veränderungen vermitteln, ohne dass eine systematische langfristige Entwicklung vorlag. Diese Eigenschaft der Extremwerte begrenzte die Trennschärfe zwischen zufälligen Schwankungen und klimatisch bedingten Veränderungen und erforderte eine zurückhaltende Interpretation insbesondere einzelner Jahre oder kurzer Zeitabschnitte.

Methodisch wurde bewusst auf modellbasierte Hochrechnungen sowie auf räumliche Interpolationen der Punktmessungen verzichtet. Dadurch blieb ein unverfälschtes Bild der tatsächlich beobachteten Messwerte erhalten, gleichzeitig war die Aussagekraft räumlich auf die Standorte der Messstationen begrenzt. Aussagen über flächenhafte Niederschlagsverteilungen oder über Gebiete ohne Messstationen konnten daher nicht getroffen werden. Die Ergebnisse waren folglich als stationsbezogene Befunde zu verstehen, die räumliche Muster andeuteten, jedoch keine vollständige Abdeckung des Untersuchungsgebiets gewährleisteten.

Auch die hydrologische Einordnung mittels Fließpfadkarten unterlag methodischen Grenzen. Die verwendeten Fließpfadkarten stellten eine indikative Darstellung potenzieller Abflusswege dar, basierten auf einer topographischen Oberflächenanalyse und berücksichtigten unterirdische Strukturen wie Kanalnetze oder Verrohrungen nicht. Sie dienten in dieser Arbeit der qualitativen Kontextualisierung der klimatologischen Ergebnisse, ersetzten jedoch keine detaillierten hydraulischen Berechnungen oder lokalen Gefährdungsanalysen. Für Regionen ohne verfügbare Fließpfadkarten bestanden zudem Datenlücken, die transparent dokumentiert wurden und die räumliche Vergleichbarkeit einschränkten.

Zusammenfassend zeigte sich, dass die gewählte Methodik eine robuste, datenbasierte Analyse der Entwicklung extremer Tagesniederschläge ermöglichte, gleichzeitig jedoch durch die Eigenschaften historischer Messdaten, die hohe Variabilität von Extremwerten sowie den bewussten Verzicht auf Modellierungen begrenzt war. Diese Einschränkungen wurden nicht als Defizit verstanden, sondern als notwendiger Bestandteil einer wissenschaftlich verantwortungsvollen Interpretation und bildeten den Rahmen für die Einordnung der Ergebnisse im anschließenden Diskussionsteil.

4. Resultate

4.1 Datengrundlage und effektive Auswertungsbasis

Dieser Abschnitt stellt die empirische Datengrundlage dar, auf der die nachfolgenden Resultate zu extremen Tagesniederschlägen in Hessen beruhten. Die Datenlage wurde dabei bewusst als Ergebnis der Aufbereitung beschrieben (und nicht als Methodik), um darzustellen, welche Messinformationen im Zeitraum 1870–2024 tatsächlich vorlagen, wie sich deren Verfügbarkeit über die Zeit veränderte.

Zugleich wurde in diesem Abschnitt die effektive Auswertungsbasis abgegrenzt: Nicht die grundsätzlich „denkbare“ Datenmenge war entscheidend, sondern die tatsächlich verwertbaren Jahresmaxima (auf Stationsebene) und deren zeitliche Abdeckung. Dadurch wurde nachvollziehbar, in welchen Zeitabschnitten belastbare Aussagen möglich waren und in welchen Zeitabschnitten die Datenabdeckung geringer war.

4.1.1 Primärdatenquelle und Untersuchungsumfang

Die Analysen basierten auf stationsbasierten Beobachtungsdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD), bereitgestellt über das Climate Data Center (CDC). Als Eingangsdaten wurden tägliche Niederschlagssummen verwendet und für das Untersuchungsgebiet Hessen über Stationszuordnung und Koordinaten räumlich referenziert.

Der Untersuchungszeitraum umfasste 1870 bis 2024 (155 Jahre). Insgesamt wurden 161 Stationen ausgewertet. Für jede Station wurde pro Kalenderjahr das Jahresmaximum der Tagesniederschlagssumme als zentrale Kenngröße bestimmt. Diese Verdichtung auf Jahresmaxima stellte eine vergleichbare Zeitreihenbasis für die deskriptive Auswertung sowie für Trend- und Bruchpunktanalysen bereit, da sie gezielt die Extremkomponente des Niederschlagsregimes abbildete. Die zusammengeführten Daten enthielten damit für jedes Stationsjahr eine eindeutige zeitliche Zuordnung (Jahr) sowie eine räumliche Referenz (Station/Koordinaten). Die Auswertbarkeit variierte jedoch stark über die Zeit, da die Messabdeckung im historischen Verlauf deutlich zunahm.

4.1.2 Zeitliche Entwicklung der Stationsverfügbarkeit

Die Anzahl verfügbarer Stationsjahre variierte im Untersuchungszeitraum sehr deutlich und spiegelt den historischen Ausbau des Messnetzes wider. In den frühesten Jahren war die Datengrundlage sehr begrenzt; so lag beispielsweise im Jahr 1870 lediglich ein nutzbarer Jahreswert aus einer Station vor. Bis in die ersten Jahrzehnte des 20. Jahrhunderts blieb die Datenabdeckung insgesamt gering und räumlich punktuell. Diese eingeschränkte Messabdeckung sowie Unterschiede in der Messtechnik sind bei der Interpretation früher Zeiträume zu berücksichtigen und schränken die Vergleichbarkeit mit späteren Abschnitten ein (vgl. Willems et al., 2023). Dieser Aspekt wird in Kapitel 4.2 weiter vertieft.

Ab 1931 zeigte sich ein markanter Anstieg der verfügbaren Jahreswerte an Stationen. In diesem Jahr lagen bereits 51 nutzbare Jahreswerte vor, während es 1930 nur 5 waren. In den Folgejahrzehnten blieb die Datenabdeckung deutlich höher als in der Frühphase, unterlag jedoch weiterhin Schwankungen. Ein klarer Einschnitt trat gegen Ende des Zweiten Weltkriegs auf: im Jahr 1945 sank die Anzahl verfügbarer Jahreswerte auf 21, bevor sie sich ab 1946/1947 wieder erholte und ab den 1950er-Jahren stabilisierte.

In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts erreichte die Messabdeckung ein dauerhaft hohes Niveau. Die maximale Abdeckung wurde 1997 mit 156 nutzbaren Jahreswerten erreicht. Über längere Phasen (insbesondere ab den 1970er/1980er-Jahren) lag die Anzahl verfügbarer Jahreswerte überwiegend im hohen dreistelligen Bereich (typisch > 130), wodurch die statistische Belastbarkeit der Auswertungen in diesen Zeiträumen deutlich erhöht war.

Für die jüngsten Jahre zeigte sich erneut ein Rückgang der verfügbaren Jahreswerte. Dieser ist im Kontext veränderter Mess- und Datenbereitstellungsstrukturen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) zu interpretieren. Der DWD hat in den letzten Jahren einzelne konventionelle Messstationen außer Betrieb genommen und verstärkt auf seit 2001 flächenhaft verfügbare radarbasierte Niederschlagsdaten zurückgreift. Dadurch verringerte sich die Anzahl verfügbarer Jahreswerte, ohne dass dies zwingend einer generellen Reduktion der Datenerfassung entspricht. Die zeitliche Entwicklung der Messabdeckung ist in Abbildung 4-1 dargestellt.

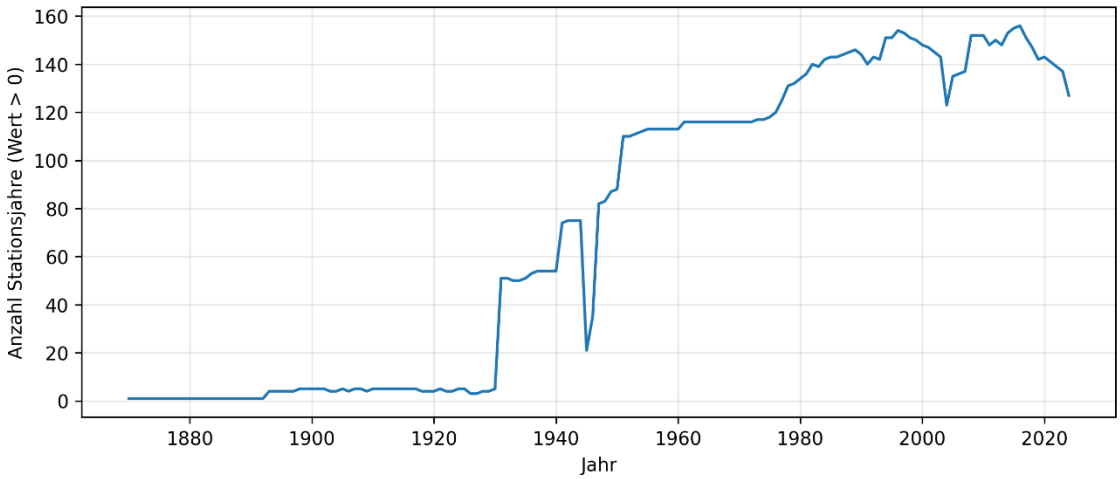


Abbildung 4: Anzahl der verfügbaren Stationsjahre im Zeitraum 1870–2024 (eigene Darstellung)

4.1.3 Umgang mit fehlenden Messwerten und Datenkennzeichnung

Die Auswertung historischer Niederschlagsdaten war mit Datenlücken verbunden, da Stationen nicht über den gesamten Zeitraum kontinuierlich betrieben wurden und Messreihen zeitweise fehlten (z. B. durch Stilllegungen, Standortverlagerungen oder technische Ausfälle). Diese Lücken betrafen besonders die frühe Untersuchungsphase, traten jedoch auch in späteren Jahren punktuell auf.

Fehlende Stationsjahre wurden in der Datenstruktur konsequent als nicht vorhanden behandelt und in den statistischen Auswertungen nicht als Messinformation interpretiert. Für Trend- und Bruchpunktanalysen flossen ausschließlich Jahre ein, in denen tatsächlich ein Jahresmaximum (Messwert > 0 mm) vorlag. Dadurch blieb die inhaltliche Aussage der Analysen auf real beobachtete Extremwerte begrenzt, und Verzerrungen durch „künstlich“ aufgefüllte Zeitreihen wurden vermieden. Gleichzeitig wurde die Datenkennzeichnung so geführt, dass die zeitliche Abdeckung jeder Stationszeitreihe nachvollziehbar blieb und Lücken eindeutig erkennbar waren. Damit konnten die dargestellten Resultate stets im Kontext der jeweils verfügbaren Datenbasis eingeordnet werden – insbesondere dort, wo geringe Stationszahlen in frühen Zeitabschnitten die Aussagekraft räumlicher und statistischer Vergleiche begrenzten.

4.1.4 Definition der effektiven Auswertungsbasis

Die im Untersuchungszeitraum grundsätzlich verfügbaren Niederschlagsdaten unterschieden sich deutlich hinsichtlich ihrer zeitlichen Länge und Kontinuität. Nicht alle Stationszeitreihen waren gleichermaßen für weiterführende statistische Analysen geeignet. Daher wurde zwischen der gesamten deskriptiv betrachteten Datengrundlage und der effektiven Auswertungsbasis für statistische Verfahren differenziert.

Als effektive Auswertungsbasis galten jene Stationszeitreihen, die eine ausreichende Länge und Datenkontinuität aufwiesen, um statistisch belastbare Aussagen zu ermöglichen. Hierzu wurden Zeitreihen mit einer Mindestlänge von 30 Jahren sowie ergänzend solche mit einer Mindestlänge von 50 Jahren betrachtet.

Stationen mit kürzeren oder stark fragmentierten Zeitreihen wurden weiterhin in der deskriptiven Analyse berücksichtigt (vgl. Abschnitt 4.2), flossen jedoch nicht oder nur eingeschränkt in die Trend- und Bruchpunktanalysen ein (Abschnitte 4.3 und 4.4).

Für jede Station wurden der Messzeitraum, die Anzahl verfügbarer Jahresmaxima sowie der Anteil fehlender Jahre dokumentiert. Auf dieser Grundlage wurde stationsspezifisch entschieden, ob die jeweilige Zeitreihe die Anforderungen an eine statistische Auswertung erfüllte. Durch diese Differenzierung wurde verhindert, dass Trends oder Strukturbrüche auf kurzen oder lückenhaften Zeitreihen überinterpretiert wurden. Die Verteilung der Stationszeitreihen nach ihrer Länge ist in Abbildung 4-2 dargestellt.

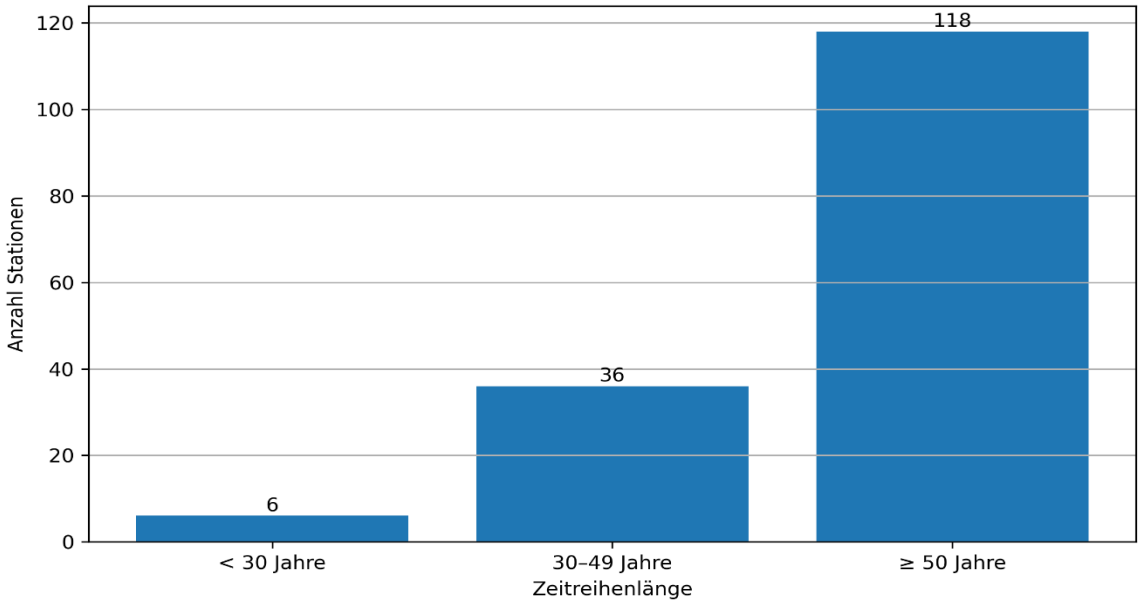


Abbildung 5: Verteilung der Messstationen nach Zeitreihenlänge (eigene Darstellung)

4.1.5 Räumliche Referenzierung der Datengrundlage

Für jede Messstation lagen eindeutige geografische Koordinaten vor. Dadurch konnten die Jahresmaxima extremer Tagesniederschläge räumlich eindeutig verortet und kartographisch dargestellt werden. Die räumliche Referenzierung ermöglichte die Integration der Stationsdaten in ein Geoinformationssystem (QGIS), wodurch sämtliche Zeitreihen punktgenau innerhalb des Untersuchungsgebiets Hessen dargestellt werden konnten. Die Verknüpfung von Jahresmaximum und Koordinate erlaubte eine konsistente räumliche Analyse über den gesamten Untersuchungszeitraum hinweg.

Auf dieser Basis konnten:

- regionale Unterschiede der Extremniederschläge,
- räumliche Häufungen einzelner Ereignisse,
- sowie die Lage signifikanter Trend- und Bruchpunktstationen

strukturiert visualisiert werden.

Die räumliche Analyse erfolgte rein beschreibend. Es wurden keine kausalen Zusammenhänge abgeleitet, sondern ausschließlich die geographische Verteilung der beobachteten Extremwerte dargestellt.

4.1.6 Zusammenfassende Bewertung der Datengrundlage

Die analysierte Datengrundlage umfasste stationsbasierte Niederschlagsmessungen für den Zeitraum 1870–2024 mit insgesamt 11.281 auswertbaren Jahreswerten. Die zeitliche Entwicklung der Messabdeckung zeigte eine klare strukturelle Differenz zwischen frühen und späteren Zeitabschnitten. Während die zweite Hälfte des 19. Jahrhunderts sowie die frühen Jahrzehnte des 20. Jahrhunderts nur eine geringe Stationsdichte aufwiesen, stand ab der Mitte des 20. Jahrhunderts eine deutlich dichtere und stabilere Datenbasis zur Verfügung. Das Maximum der Stationsverfügbarkeit wurde in den späten 1990er-Jahren erreicht.

Die Differenzierung zwischen der gesamten Datengrundlage und der definierten effektiven Auswertungsbasis stellte sicher, dass statistische Analysen ausschließlich auf ausreichend langen und konsistenten Zeitreihen beruhten. Gleichzeitig blieb die vollständige Datenmenge für die deskriptive Ergebnisdarstellung erhalten. Für frühe Untersuchungsjahre war die Aussagekraft aufgrund geringer Stationsdichte eingeschränkt, während für spätere Zeitabschnitte eine dichtere Datenbasis vorlag.

Insgesamt bildete die strukturierte Aufbereitung der Datengrundlage die Voraussetzung für die nachfolgenden Analysen der Extremniederschläge. Sämtliche Resultate in den folgenden Abschnitten sind vor dem Hintergrund der dargestellten zeitlichen und räumlichen Datenverfügbarkeit zu interpretieren.

4.2 Deskriptive Analyse der maximalen Tagesniederschläge

Die deskriptive Analyse diente der strukturierten Darstellung der beobachteten Jahresmaxima extremer Tagesniederschläge. Im Fokus standen die zeitliche Entwicklung und Variabilität der Extremwerte sowie deren räumliche Verteilung und stationsspezifische Unterschiede. Die Darstellung blieb bewusst beschreibend; erklärende Einordnungen erfolgten in der Diskussion.

4.2.1 Zeitliche Entwicklung der jährlichen Maxima extremer Tagesniederschläge

Die zeitliche Entwicklung der jährlichen Maxima zeigte über den gesamten Untersuchungszeitraum eine ausgeprägte interannuelle Variabilität. Die höchsten beobachteten Tagesniederschläge unterschieden sich von Jahr zu Jahr erheblich. Jahre mit vergleichsweise moderaten Extremwerten wechselten mit Jahren außergewöhnlich hoher Maximalwerte. Die zeitliche Entwicklung der jährlichen maximalen Tagesniederschläge ist in Abbildung 4-3 dargestellt.

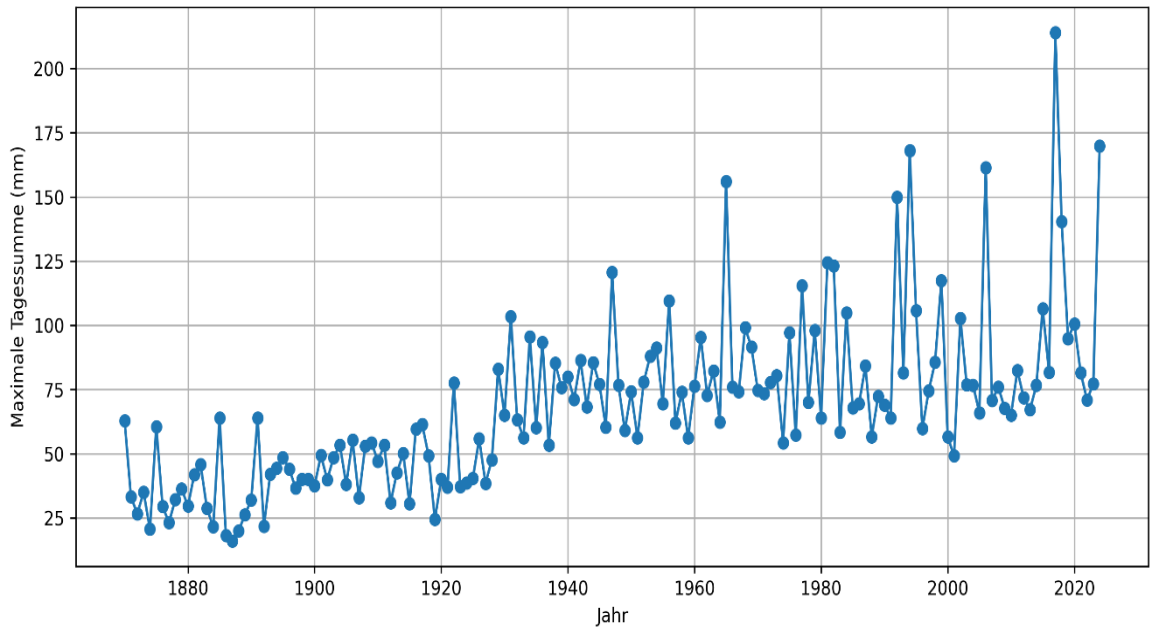


Abbildung 6: Zeitliche Entwicklung der jährlichen maximalen Tagesniederschläge (in mm) im Zeitraum 1870-2024
Dargestellt sind die jeweils höchsten gemessenen Tageswerte pro Jahr über alle verfügbaren Stationen
(eigene Darstellung)

Ein gleichförmiger oder monoton verlaufender Trend war in der Zeitreihe nicht eindeutig erkennbar. Visuell deutete sich jedoch insbesondere in den späteren Jahrzehnten ein Anstieg der maximalen Tagesniederschläge an. Dabei war zu berücksichtigen, dass dieser Eindruck teilweise durch die im Zeitverlauf zunehmende Anzahl verfügbarer Jahresmaxima aus Stationsmessungen beeinflusst wurde.

In der Frühphase des Datensatzes (bis etwa 1930) lagen die dokumentierten Extremwerte überwiegend im Bereich moderater Intensitäten. Diese Phase war jedoch durch eine deutlich geringere Stationsdichte gekennzeichnet (vgl. Abschnitt 4.1.2), wodurch die Spannweite der beobachteten Extremwerte eingeschränkt war.

Mit dem Ausbau des Messnetzes ab den 1930er- und insbesondere ab den 1950er-Jahren vergrößerte sich die Spannweite der beobachteten Jahresmaxima deutlich. In den späteren Jahrzehnten traten mehrfach sehr hohe Tagesniederschläge ≥ 100 mm auf.

Besonders auffällige Einzeljahre mit hohen Maximalwerten waren beispielsweise 1965, 1992, 1994, 2005, 2017 und 2024. Darüber hinaus stellte das Jahr 1981 einen Sonderfall dar, da hier an vielen Stationen gleichzeitig erhöhte Niederschläge auftraten, ohne dass ein einzelner Extremwert besonders hervorstach. Die zeitliche Abfolge der Extremjahre folgte keinem regelmäßigen Muster.

Zusammenfassend zeigte die visuelle Betrachtung der Zeitreihe keinen klar linearen oder gleichförmigen Trend. Gleichzeitig deutete sich insbesondere in den jüngeren Jahrzehnten eine Zunahme hoher Extremwerte an. Diese Entwicklung ist jedoch vor dem Hintergrund der im Zeitverlauf veränderter Datengrundlage sowie der ausgeprägten interannuellen Variabilität zu interpretieren, die eine eindeutige Identifikation langfristiger Trends erschwerte.

4.2.2 Räumliche Verteilung der Extremniederschläge

Die räumliche Analyse der maximalen Tagesniederschlagssummen zeigte eine deutliche Heterogenität innerhalb des Untersuchungsgebiets Hessen. Extreme Tagesniederschläge traten nicht flächendeckend gleichmäßig auf, sondern wiesen räumlich differenzierte Schwerpunkte auf. Gleichzeitig konnten Starkniederschlagsereignisse grundsätzlich im gesamten Untersuchungsgebiet auftreten. In der Frühphase des Untersuchungszeitraums war die räumliche Aussagekraft aufgrund der geringen Stationsdichte eingeschränkt. Die wenigen verfügbaren Stationen erlaubten lediglich punktuelle Aussagen zu lokalen Starkniederschlagsereignissen. Eine flächenhafte Bewertung war für diese Phase nicht möglich.

Mit zunehmender Stationsdichte ab der Mitte des 20. Jahrhunderts erweiterten sich die räumlichen Darstellungsmöglichkeiten erheblich. In den kartographischen Auswertungen zeigten sich wiederholt hohe Extremwerte sowohl in Mittelgebirgsregionen als auch in tiefer gelegenen Bereichen.

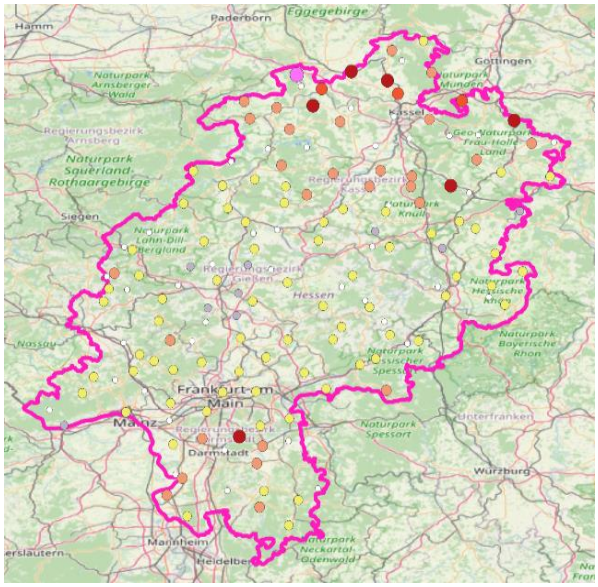
Eine dauerhafte Konzentration extremer Tagesniederschläge auf einzelne Regionen war jedoch nicht erkennbar. Vielmehr variierte die räumliche Verteilung stark zwischen einzelnen Jahren:

- In manchen Jahren traten punktuelle Häufungen an wenigen Stationen auf.
- In anderen Jahren waren mehrere Regionen innerhalb desselben Jahres von erhöhten Tagesniederschlägen betroffen.

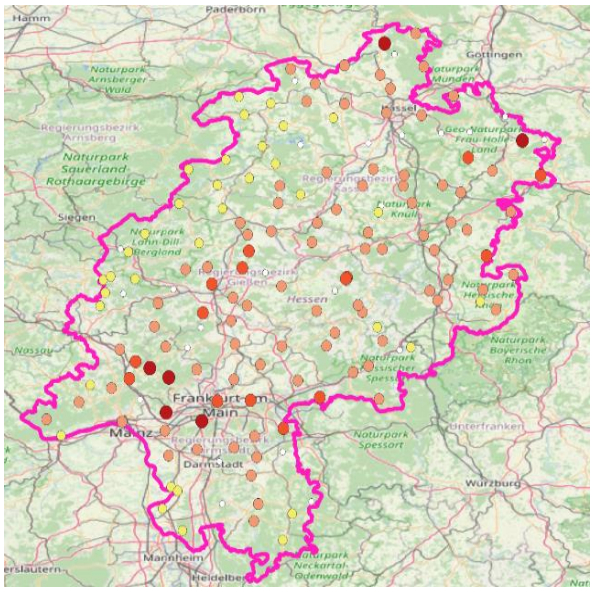
Insgesamt zeigte die räumliche Analyse eine klare Heterogenität der Extremniederschläge innerhalb Hessens, ohne ein dauerhaft konsistentes räumliches Intensitätsmuster erkennen zu lassen.

4.2.3 Interannuelle Variabilität und auffällige Extremjahre

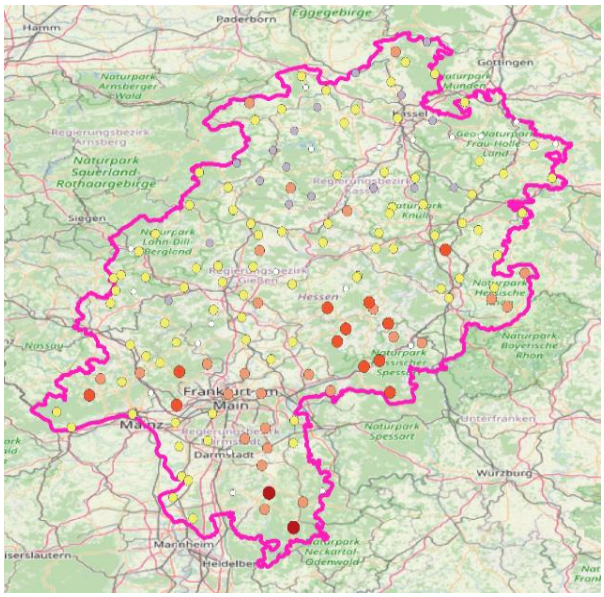
Die Auswertung der jährlichen Maxima extremer Tagesniederschläge zeigte eine ausgeprägte interannuelle Variabilität. Die höchsten registrierten Tagesniederschläge schwankten von Jahr zu Jahr erheblich, ohne dass eine regelmäßige zeitliche Abfolge besonders intensiver oder besonders schwacher Extremjahre erkennbar war. Die räumliche Verteilung extremer Ereignisse in ausgewählten Jahren ist in Abbildung 4-4 dargestellt.



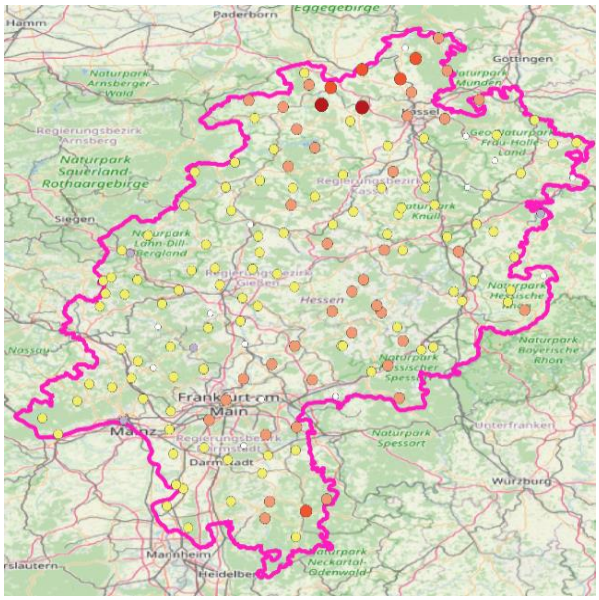
a) 1965



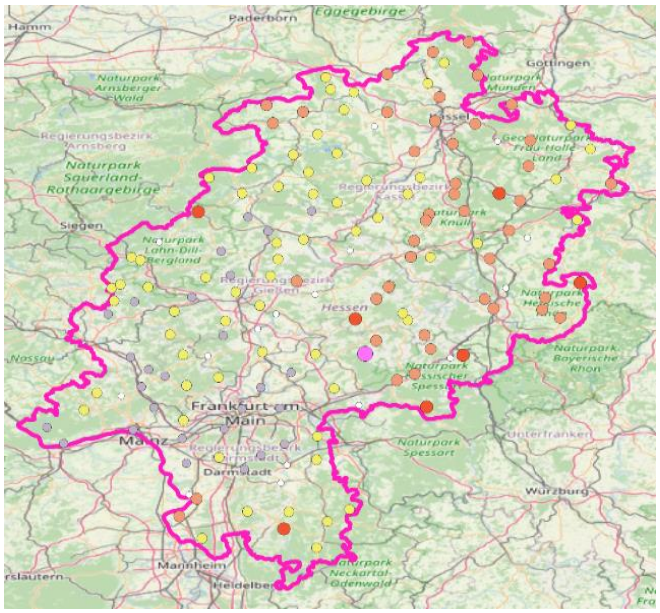
b) 1981



c) 1982



d) 2002



e) 2019

Abbildung 7: Räumliche Verteilung extremer Tagesniederschläge in ausgewählten Extremjahren (1965, 1981, 1982, 2002 und 2019) (eigene Darstellung)

Mehrere Jahre stachen durch eine außergewöhnlich hohe Anzahl von Starkniederschlagsereignissen mit erhöhten Tagesniederschlägen hervor, ohne dass zwingend die jeweils höchsten Einzelwerte erreicht wurden. Hierzu zählten insbesondere die Jahre 1965, 1981, 1982, 2002 und 2019.

- Das Jahr 1965 wies zahlreiche Ereignisse ≥ 50 mm auf, wobei die höchsten Intensitäten im Vergleich zu späteren Extremjahren geringer ausfielen.
- Das Jahr 1981 zeigte die höchste Anzahl an Starkniederschlagsereignissen über alle betrachteten Schwellenwerte hinweg. Besonders auffällig war das gehäufte Auftreten sehr hoher Tagesniederschläge ≥ 100 mm.
- Das Jahr 1982 war durch viele Ereignisse im Bereich von 50–75 mm gekennzeichnet, während Extremwerte ≥ 100 mm vergleichsweise selten auftraten.
- Im Jahr 2002 traten regionale Häufungen erhöhter Tagesniederschläge auf, ohne ein konsistentes räumliches Muster über das gesamte Untersuchungsgebiet.
- Das Jahr 2019 war durch eine erhöhte Anzahl von Starkniederschlagsereignissen geprägt, die jedoch räumlich fragmentiert auftraten und überwiegend lokal begrenzt waren.

Die exemplarische Betrachtung dieser Jahre verdeutlichte, dass extreme Tagesniederschläge keine eindeutige zeitliche Konzentration auf einen bestimmten Abschnitt des Untersuchungszeitraums erkennbar war. Darüber hinaus zeigte sich, dass besonders hohe Tagesniederschläge nicht zwangsläufig mit insgesamt niederschlagsreichen Jahren korrelierten. Einzelne außergewöhnliche Starkniederschlagsereignisse konnten auch in Jahren auftreten, die im Jahresmittel keine besonderen Auffälligkeiten aufwiesen.

Insgesamt bestätigte die Analyse, dass das Auftreten extremer Tagesniederschläge maßgeblich durch episodische Einzelereignisse und stark schwankende Jahresbedingungen geprägt war.

4.2.4 Stationsspezifische Unterschiede der Extremniederschläge

Die stationsbezogene Auswertung der maximalen Tagesniederschlagssummen zeigte deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Messstationen. Exemplarisch zeigt die Abbildung 4-5 die höchsten beobachteten Extremwerte ausgewählter Stationen.

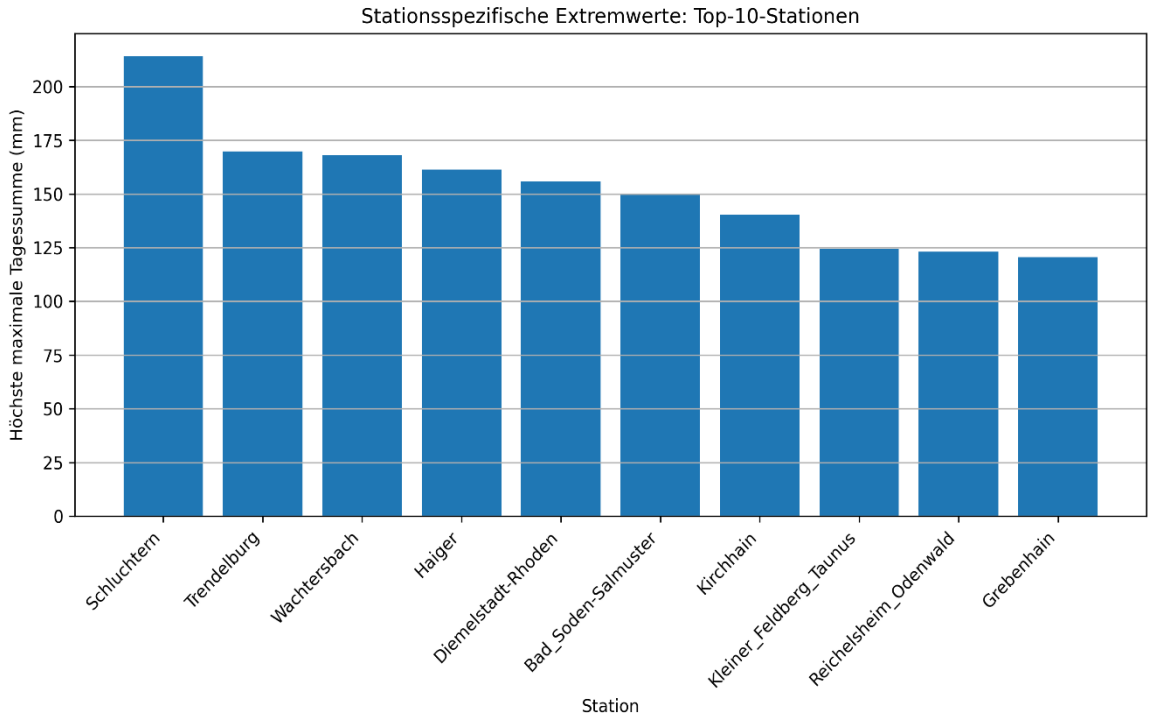


Abbildung 8: Stationsspezifische maximale Tagesniederschläge der Top-10-Stationen in Hessen (eigene Darstellung)

Sowohl die Höhe der registrierten Extremwerte als auch deren zeitliches Auftreten variierten erheblich. Einige Stationen wiesen wiederholt sehr hohe maximale Tagesniederschläge auf, während an anderen Stationen über längere Zeiträume hinweg vergleichsweise geringere Extremwerte beobachtet wurden. Diese Unterschiede traten nicht nur zwischen räumlich weit voneinander entfernten Regionen auf, sondern teilweise auch zwischen benachbarten Stationen. Damit zeigte sich eine ausgeprägte lokale Differenzierung extremer Niederschläge.

Gleichzeitig unterschieden sich die Stationszeitreihen hinsichtlich ihrer Länge und zeitlichen Kontinuität. Stationen mit langen, nahezu vollständigen Zeitreihen ermöglichten eine robustere Einordnung extremer Jahre, während kürzere Reihen eine stärkere Sensitivität gegenüber einzelnen Starkniederschlagsereignissen aufwiesen.

Eine einheitliche stationsübergreifende Intensitätsstruktur war nicht erkennbar. Vielmehr zeigten die Daten eine hohe lokale Variabilität sowohl hinsichtlich der maximalen Intensität als auch hinsichtlich der zeitlichen Abfolge extremer Ereignisse.

Zusammenfassend verdeutlichte die stationsspezifische Analyse, dass extreme Tagesniederschläge in Hessen kein homogenes Muster aufwiesen, sondern durch ausgeprägte lokale Unterschiede gekennzeichnet waren. Diese Ergebnisse bildeten die empirische Grundlage für die nachfolgenden statistischen Untersuchungen zu Trends und Bruchpunkten auf Stationsebene.

4.3 Trendanalyse der maximalen Tagesniederschlagssummen

Die stationsbasierte Trendanalyse zeigte, dass nur ein geringer Anteil der untersuchten Messstationen statistisch signifikante Veränderungen der jährlichen maximalen Tagesniederschläge aufwies.

Von allen analysierten Stationen ergaben sich:

- 7 Stationen mit signifikant positivem Trend ($p < 0,05$)
- 2 Stationen mit signifikant negativem Trend ($p < 0,05$)

Die Stationen mit signifikant positivem Trend waren:

- Flörsbachtal-Flörsbach (Zeitraum: 1951-2024, n = 74 Jahre)
- Meißner (Zeitraum: 1987-2024, n = 38 Jahre)
- Münzenberg-Gambach (Zeitraum: 1941-2024, n = 83 Jahre)
- Neustadt (Zeitraum: 1931-2024, n = 93 Jahre)
- Ottrau-Immichenhain (Zeitraum: 1951-2024, n = 74 Jahre)
- Schwalmstadt-Ascherode (Zeitraum: 1931-2024, n = 93 Jahre)
- Usingen (Zeitraum: 1995-2023, n = 29 Jahre)

Signifikant negative Trends wurden an den Stationen Gernsheim und Messel identifiziert.

Die Mehrzahl der untersuchten Stationen zeigte keinen statistisch nachweisbaren Trend. In diesen Zeitreihen dominierte die interannuelle Variabilität, sodass keine gerichtete langfristige Entwicklung festgestellt werden konnte.

Die Trendstationen unterschieden sich hinsichtlich ihrer Zeitreihenlänge deutlich. Während einzelne Stationen Beobachtungszeiträume von über 90 Jahren aufwiesen, basierten andere signifikante Trends auf kürzeren Reihen (< 30 Jahre). Bei kürzeren Zeitreihen war erkennbar, dass einzelne Extremjahre einen stärkeren Einfluss auf das Testergebnis ausübten.

4.3.1 Räumliche Verteilung der Trendstationen

Die räumliche Darstellung der signifikanten Trendstationen zeigte eine fragmentierte Verteilung innerhalb Hessens. Die farbliche Codierung der Stationen ist in Abbildung 4-6 dargestellt.

Die sieben Stationen mit positivem Trend (rosa dargestellt) lagen sowohl in Nord- als auch in Südhessen und bildeten kein zusammenhängendes Trendgebiet. Auch die beiden Stationen mit negativem Trend (schwarz dargestellt) traten isoliert auf. Räumlich benachbarte Stationen wiesen teilweise unterschiedliche Trendcharakteristika auf. In mehreren Fällen lagen trendfreie Stationen (grau dargestellt) unmittelbar neben Stationen mit signifikanten Trends.

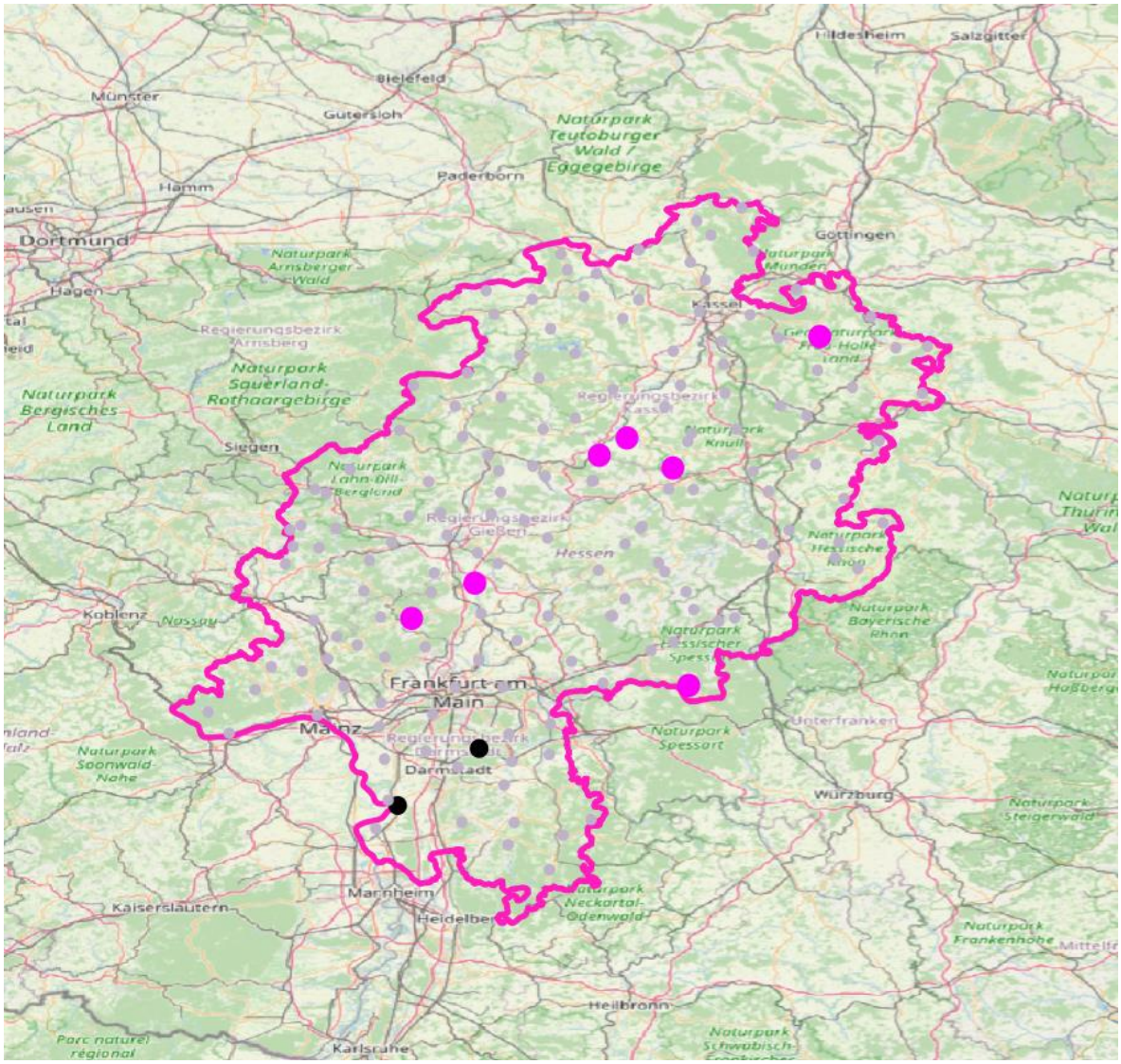


Abbildung 9: Räumliche Verteilung signifikanter Trendstationen in Hessen (eigene Darstellung)

Eine eindeutige räumliche Konzentration oder ein durchgängiges Trendmuster war nicht erkennbar. Signifikante Trends traten sowohl in Mittelgebirgsregionen als auch in tiefer gelegenen Bereichen auf. Ein systematischer Zusammenhang zwischen Höhenlage und Trendrichtung ließ sich nicht feststellen.

4.3.2 Zeitliche Einordnung der Trendbeginne

Ein einheitlicher zeitlicher Beginn der identifizierten Trends war nicht erkennbar. Die signifikanten Entwicklungen traten stationsspezifisch auf und zeigten keine gemeinsame zeitliche Struktur.

In vielen Zeitreihen überlagerte die ausgeprägte interannuelle Variabilität mögliche langfristige Veränderungen. Die festgestellten Trends stellten daher punktuelle, stationsbezogene Befunde dar.

4.3.3 Zusammenfassende Bewertung der Trendanalyse

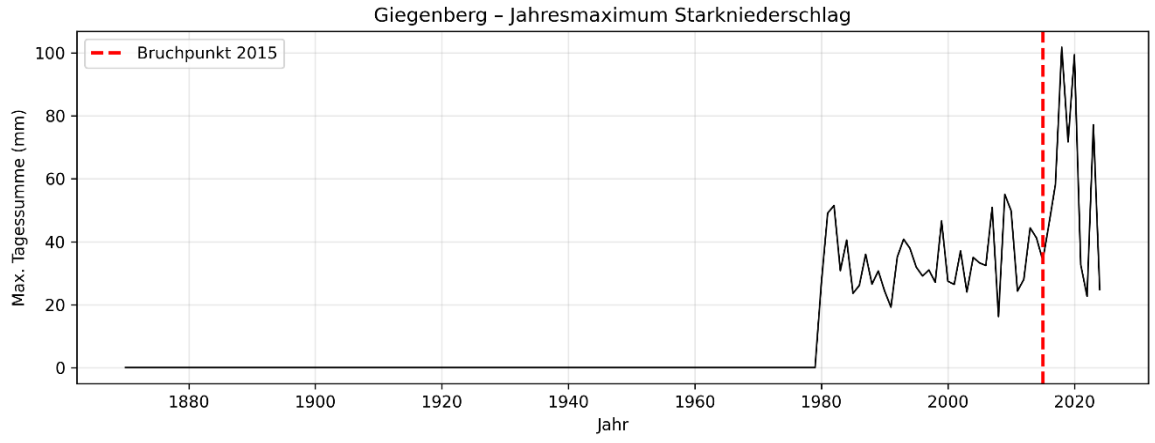
Insgesamt zeigten nur 9 Stationen signifikante Trends (7 positiv, 2 negativ), während die große Mehrheit der Stationen keine statistisch gesicherte Veränderung der jährlichen maximalen Tagesniederschläge aufwies. Eine flächenhaft konsistente Zunahme oder Abnahme extremer Tagesniederschläge in Hessen ließ sich auf Grundlage der stationsbasierten Trendtests nicht ableiten.

4.4 Bruchpunktanalyse der maximalen Tagesniederschlagssummen

Die Bruchpunktanalyse ergänzte die Trendanalyse, indem untersucht wurde, ob sich innerhalb einzelner Stationszeitreihen signifikante Strukturänderungen identifizieren ließen. Während die Trendanalyse auf eine kontinuierliche Zu- oder Abnahme der Extremwerte abzielte, fokussierte die Bruchpunktanalyse auf mögliche abrupte Niveauänderungen innerhalb der Zeitreihen.

4.4.1 Identifikation von Stationen mit Bruchpunkten

Die Auswertung zeigte, dass nur ein begrenzter Teil der untersuchten Stationen einen statistisch signifikanten Bruchpunkt aufwies. Bei der Mehrzahl der Stationen konnte kein signifikanter Strukturwechsel identifiziert werden. Exemplarische Zeitreihen mit identifizierten Bruchpunkten sind in Abbildung 4-7 dargestellt. Die vertikalen gestrichelten Linien markieren die identifizierten Bruchpunkte.



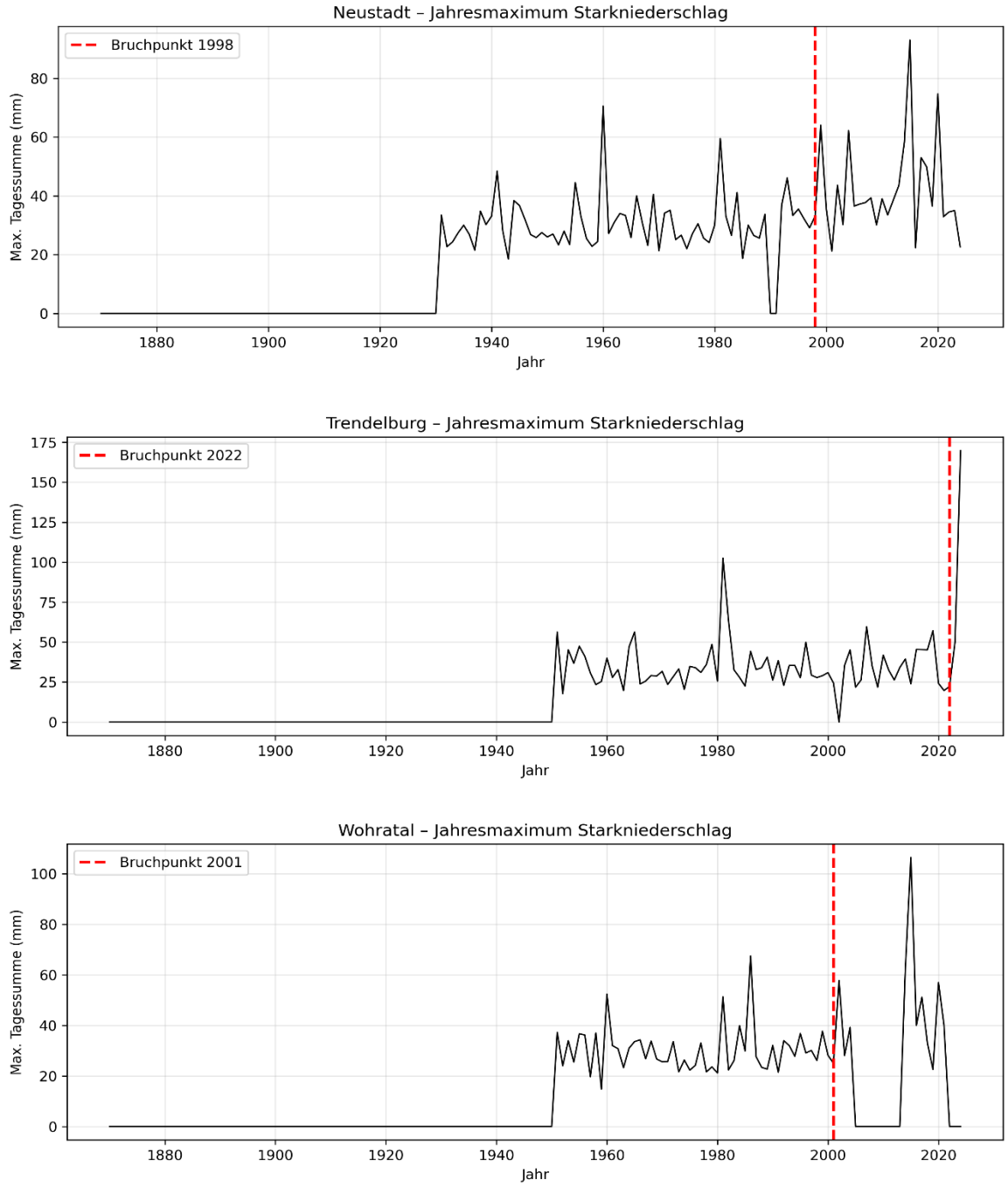


Abbildung 10: Beispiele von Zeitreihen mit identifizierten Bruchpunkten an ausgewählten Stationen (eigene Darstellung)

Die identifizierten Bruchpunkte traten in unterschiedlichen Jahren auf. Eine Konzentration auf ein bestimmtes Jahrzehnt war nicht erkennbar. Bei einzelnen Stationen wurden rechnerisch mehrere potenzielle Bruchpunkte ermittelt. In diesen Fällen wurde ausschließlich der statistisch dominante Bruchpunkt berücksichtigt, um eine einheitliche Vergleichsbasis zu gewährleisten.

Zwischen Trend- und Bruchpunktbefunden bestand keine vollständige Übereinstimmung. Nicht alle Stationen mit signifikantem Trend wiesen einen Bruchpunkt auf, und umgekehrt traten Bruchpunkte teilweise auch bei trendfreien Stationen auf. Kontinuierliche Trends und abrupte Strukturwechsel stellten somit unterschiedliche Erscheinungsformen zeitlicher Veränderungen dar.

4.4.2 Zeitliche Häufung und Verteilung der Bruchpunkte

Die zeitliche Analyse zeigte keine ausgeprägte Bündelung der Bruchpunkte in einem bestimmten Jahrzehnt. Die identifizierten Strukturwechsel verteilten sich über verschiedene Zeitabschnitte, ohne dass ein dominierender Zeitraum erkennbar war.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Anzahl potenziell identifizierbarer Bruchpunkte von der jeweiligen Stationsverfügbarkeit abhing. Frühere Zeitabschnitte mit geringerer Stationsdichte boten naturgemäß weniger Zeitreihen, in denen Strukturwechsel statistisch erkannt werden konnten. Auch in Phasen mit dichter Messabdeckung zeigte sich jedoch keine landesweit kohärente zeitliche Konzentration.

4.4.3 Räumliche Verteilung der Bruchpunktstationen

Die räumliche Analyse zeigte eine fragmentierte Verteilung der Stationen mit identifizierten Bruchpunkten innerhalb Hessens. Eine geschlossene regionale Struktur war nicht erkennbar.

Während an einzelnen Stationen ein signifikanter Strukturwechsel identifiziert wurde, zeigten benachbarte Stationen keine entsprechende Veränderung. Bruchpunkte traten sowohl in Mittelgebirgsregionen als auch in tiefer gelegenen Bereichen auf, ohne dass sich eine systematische regionale Zuordnung ableiten ließ.

4.4.4 Verhältnis von Bruchpunkten und Trends

Die kombinierte Betrachtung von Trend- und Bruchpunktbefunden verdeutlichte, dass beide Analyseansätze unterschiedliche Formen zeitlicher Veränderungen abbildeten.

Ein Teil der Stationen mit signifikantem Trend wies zusätzlich einen Bruchpunkt auf. Andere Stationen zeigten einen Trend ohne Bruchpunkt oder einen Bruchpunkt ohne Trend. Ein weiterer Teil der Stationen wies weder Trend noch Bruchpunkt auf.

4.4.5 Zusammenfassende Bewertung der Bruchpunktanalyse

Die Bruchpunktanalyse ergab, dass signifikante Strukturwechsel nur bei einem Teil der untersuchten Stationszeitreihen identifiziert werden konnten. Weder zeitlich noch räumlich zeigte sich eine kohärente Bündelung der identifizierten Strukturänderungen.

In der kombinierten Betrachtung mit der Trendanalyse ergab sich ein differenziertes Bild aus kontinuierlichen Entwicklungen, punktuellen Strukturwechseln sowie Zeitreihen ohne statistisch nachweisbare Veränderungen. Eine flächenhaft einheitliche Veränderung extremer Tagesniederschläge in Hessen ließ sich auch auf Grundlage der Bruchpunktanalyse nicht ableiten.

4.5 Räumliche Einordnung der Trendstationen und hydrologischer Bezug

Dieser Abschnitt ordnet die sieben Stationen mit signifikant positivem Trend der maximalen Tagesniederschlagssummen in ihren jeweiligen lokalen Abflusskontext ein. Im Mittelpunkt stand die Frage, wie die Stationsstandorte topographisch eingebunden sind und welche potenziellen Fließwege sich vom jeweiligen Standort aus talwärts ergeben. Die Analyse erfolgte konsequent hangabwärts. Berücksichtigt wurden ausschließlich Fließpfade, die vom Stationsstandort aus in Richtung tiefer gelegener Bereiche verlaufen. Oberhalb oder seitlich gelegene Abflusslinien ohne direkte Abflussverbindung wurden nicht einbezogen. Die Darstellung erfolgt rein deskriptiv.

4.5.1 Meißner (51.2185°N, 9.8228°E)

Die Station Meißner befindet sich im Bereich einer größeren Hof- bzw. Gebäudestruktur im Übergangsbereich zwischen Gehölz-/Waldstrukturen und offenen landwirtschaftlichen Flächen. Der Standort stellt eine Nutzungsinsel innerhalb einer topographisch stark strukturierten Umgebung dar.

Die Fließpfadstruktur zeigt mehrere kleinräumige Abflusslinien aus der Hangfläche, die sich talwärts bündeln. Charakteristisch ist eine konvergente Abflussstruktur, bei der zahlreiche kleinere Zuflüsse in eine ausgeprägtere Tiefenlinie übergehen. Solche Standorte liegen häufig im Bereich natürlicher Sammelzonen.

Potenzielle Sensitivitäten ergeben sich insbesondere an Übergängen zwischen Feld-, Wald- und Hofflächen. Zufahrten, befestigte Hofbereiche sowie Geländekanten können als Sammel- und Umlenkungsräume wirken. Die Kombination aus reliefbedingter Konzentration und baulicher Nutzung weist auf eine lokal erhöhte Vulnerabilität gegenüber konzentriertem Oberflächenabfluss hin.

4.5.2 Schwalmstadt-Ascherode (50.9033°N, 9.2129°E)

Die Station Ascherode liegt am Rand einer Ortslage im Übergangsbereich zwischen landwirtschaftlichen Flächen und Wohnbebauung. In unmittelbarer Nähe befindet sich eine lineare Vorflutstruktur. Die Fließpfade verlaufen aus den umgebenden Flächen in Richtung Ortslage und folgen dabei den natürlichen Tiefenlinien. Innerhalb der Bebauung wird der Abfluss entlang von Straßenachsen, Grundstücksgrenzen und kleinräumigen Entwässerungsstrukturen geführt. Potenzielle kritische Punkte liegen insbesondere im Bereich von Straßenquerungen und Engstellen.

Der Übergang von Außengebiet zu Siedlungsraum stellt einen sensiblen Bereich dar, da hier konzentrierter Hang- und Flächenabfluss auf versiegelte Strukturen trifft.

4.5.3 Neustadt (50.8494°N, 9.1253°E)

Die Station Neustadt befindet sich im bebauten Gebiet mit unmittelbar angrenzender Feldflur. Der Standort liegt an einer klar erkennbaren Schnittstelle zwischen offener landwirtschaftlicher Fläche und Wohngebiet. Die Fließpfade zeigen einen Übergang von breit generiertem Oberflächenabfluss auf der Feldfläche hin zu einer Bündelung entlang innerörtlicher Straßenstrukturen. Abfluss aus der offenen Fläche wird an Geländekanten und baulichen Strukturen linear kanalisiert. Besonders sensibel erscheinen Tiefpunkte innerhalb des Wohngebiets, etwa Kreuzungsbereiche oder Grundstückszufahrten, an denen Wasser temporär akkumulieren kann. Die Konstellation entspricht einem typischen Szenario „Außengebietszufluss trifft Siedlungsraum“.

4.5.4 Ottrau-Immichenhain (50.81°N, 9.3581°E)

Die Station liegt innerhalb der Ortslage nahe einer innerörtlichen Hauptachse. Im Abstrombereich schließen landwirtschaftliche Flächen und Freiflächen an. Mehrere Fließpfade verlaufen in Richtung Ortsgebiet und werden dort entlang von Straßen und Gräben geführt. Gleichzeitig ist eine Weiterleitung des Abflusses in Richtung tiefer gelegener Vorflutstrukturen erkennbar. Straßenflächen fungieren als lineare Abflusskorridore. An Übergängen zu Gräben oder Einläufen können bei Starkregen Rückstau- oder Umlenkungseffekte auftreten. Der Standort repräsentiert eine Situation, in der Siedlungsabfluss und Außengebietszuflüsse potenziell zusammentreffen.

4.5.5 Münzenberg-Gambach (50.4521°N, 8.7318°E)

Die Station befindet sich im Bereich einer Kläranlage mit mehreren runden Beckenstrukturen, charakteristisch für wasserwirtschaftliche Infrastruktur. Die Umgebung ist überwiegend durch offene Feldflur geprägt. Die Fließpfade zeigen eine deutliche Bündelung in Richtung der linearen Entwässerungsstruktur. Technische Anlagen dieser Art liegen häufig in hydrologisch günstigen Vorflutbereichen, in denen sich jedoch auch natürliche Abflussbahnen konzentrieren.

Potenzielle Sensitivitäten betreffen vor allem Zuläufe, Gräben und befestigte Betriebsflächen. Bei Starkniederschlagsereignissen können Rückstau oder Überströmung innerhalb der Anlage auftreten. Hier steht weniger die Wohnnutzung als vielmehr die Funktionsfähigkeit der Infrastruktur im Vordergrund.

4.5.6 Usingen (50.3426°N, 8.53172°E)

Die Station Usingen liegt im Bereich der Hochtaunus-Kliniken bzw. angrenzender Betriebsflächen mit ausgeprägten versiegelten Strukturen. Die Fließpfade verlaufen aus offenen Flächen in Richtung der baulichen Anlagen und werden durch Parkflächen, Zufahrten und Geländekanten gelenkt. Große versiegelte Flächen begünstigen eine rasche Abflusskonzentration. Im Umfeld kritischer Infrastruktur wie einem Klinikum sind selbst moderate Überflutungen relevant. Zufahrten, Rettungswege sowie technische Einrichtungen können durch konzentrierten Oberflächenabfluss beeinträchtigt werden. Die Kombination aus Starkregentrend und infrastruktureller Sensitivität ist hier besonders bedeutsam.

4.5.7 Flörsbachtal-Flörsbach (50.1344°N, 9.4083°E)

Die Station liegt am Rand der Ortslage Flörsbach im Übergang zu Wiesen- und Feldflächen mit erkennbaren Gehölz- und Heckenstrukturen. Der Standort befindet sich nahe einer linearen Geländesenke bzw. kleineren Abflussbahn, die Wasser aus den umliegenden Flächen sammelt und in Richtung Ortsgebiet leitet. Das Muster entspricht einer typischen Mulden- oder Grabenstruktur mit punktueller Abflusskonzentration. Übergänge an Straßen oder Einläufen stellen potenzielle Engstellen dar, insbesondere bei Sedimenteintrag oder Verklausung. Der Standort repräsentiert eine Konstellation, bei der Außengebietszufluss in unmittelbarer Ortsnähe auf technische Entwässerungsstrukturen trifft.

4.5.8 Zusammenfassende Bewertung der räumlichen Einordnung

Die räumliche Analyse zeigt, dass die sieben Stationen mit signifikant positivem Trend in klar definierbare lokale Einzugsbereiche eingebunden sind. In sämtlichen Fällen konnte ein talwärts gerichteter Oberflächenabfluss vom Stationsstandort aus identifiziert werden. Die Standorte weisen unterschiedliche topographische und nutzungsbezogene Rahmenbedingungen auf. Mehrere Stationen liegen an Übergängen zwischen landwirtschaftlicher Fläche und Siedlungsraum, andere im Bereich technischer Infrastruktur oder größerer Gebäudekomplexe. Gemeinsames Merkmal war die potenzielle Bündelung von Oberflächenabfluss in Richtung bebauter oder infrastrukturell genutzter Bereiche.

Eine einheitliche hydrologische Charakteristik der Trendstationen lässt sich nicht ableiten. Stattdessen zeigt sich, dass lokal unterschiedliche Konstellationen – Hanglagen, Mulden, versiegelte Flächen oder infrastrukturelle Einrichtungen – mit signifikanten Trends extremer Tagesniederschläge zusammentreffen können. Die Darstellung dient der kontextuellen Einordnung der Trendbefunde und beinhaltet keine quantitative Gefährdungs- oder Risikobewertung.

4.6 Einfluss des Jahres 1981 auf die Ergebnisstruktur

Die vorangegangenen Analysen zeigten eine Zunahme registrierter Jahreshöchstwerte (≥ 50 mm) in der zweiten Hälfte des Untersuchungszeitraums. Da das Jahr 1981 durch eine außergewöhnlich hohe Ereignisdichte gekennzeichnet war, wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um den Einfluss dieses Einzeljahres auf die Gesamtstruktur der Ergebnisse systematisch zu prüfen.

Untersucht wurden:

- die Entwicklung der Messabdeckung,
- die Gesamtzahl aller Niederschlagsereignisse (> 0 mm),
- die Anzahl der Jahreshöchstwerte (≥ 50 mm),
- sowie die Verteilung nach Intensitätsklassen,

jeweils mit und ohne Berücksichtigung des Jahres 1981.

4.6.1 Entwicklung der Messabdeckung im Untersuchungszeitraum

Die Messabdeckung – dargestellt als Anzahl der Messwerte > 0 mm – nahm im Verlauf des 20. Jahrhunderts deutlich zu (vgl. Abbildung 4-8). Bis in die ersten Jahrzehnte war die Datendichte gering. Ab den 1930er-Jahren setzte eine kontinuierliche Verdichtung ein, die sich insbesondere ab den 1950er-Jahren verstärkte. Seit den 1970er- bzw. frühen 1980er-Jahren erreichte die Messabdeckung ein dauerhaft hohes und weitgehend stabiles Niveau.

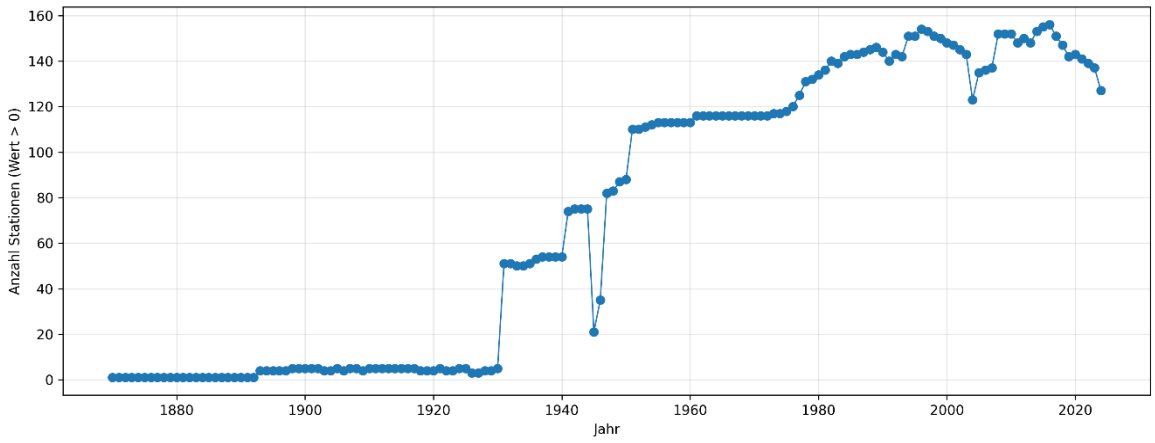


Abbildung 11: Entwicklung der Messabdeckung (Anzahl der Messwerte > 0 mm pro Jahr) im Zeitraum 1870-2024 (eigene Darstellung)

Ein temporärer Rückgang um 1945 ist plausibel auf kriegsbedingte Einschränkungen zurückzuführen. Der leichte Rückgang im jüngsten Zeitraum ist vielmehr auf Veränderungen im Messnetz zurückzuführen, insbesondere auf die Reduktion klassischer Messstationen und die verstärkte Nutzung radarbasierter Niederschlagsdaten.

Damit sind frühe Zeiträume nur eingeschränkt mit späteren Abschnitten vergleichbar. Ab etwa der Mitte des 20. Jahrhunderts liegt jedoch eine belastbare empirische Grundlage vor.

4.6.2 Gesamtanzahl der ausgewerteten Jahresmaxima - Schnittjahr 1980

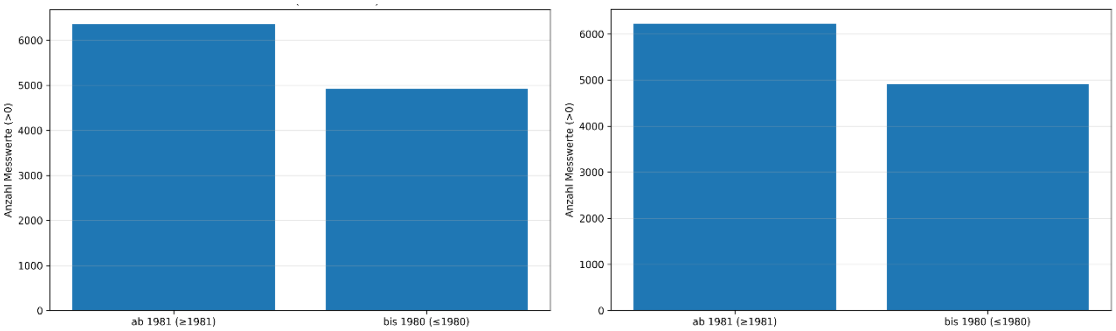


Abbildung 12: Gesamtzahl der in die Analyse einbezogenen Jahresmaxima (ein Wert pro Station und Jahr) vor und nach dem Schnittjahr 1980, jeweils mit (links) und ohne (rechts) Berücksichtigung des Jahres 1981 (eigene Darstellung)

Die Gesamtzahl der in die Analyse einbezogenen Jahresmaxima lag im Zeitraum ab 1981 deutlich über jener bis einschließlich 1980 (vgl. Abbildung 4-9). Der Ausschluss des Jahres 1981 reduzierte die Anzahl geringfügig, veränderte jedoch nicht die grundsätzliche Relation zwischen den Zeiträumen. Der Unterschied ist somit primär auf die im Zeitverlauf verbesserte Messabdeckung zurückzuführen.

4.6.3 Gesamtanzahl der ausgewerteten Jahresmaxima - Schnittjahr 1985

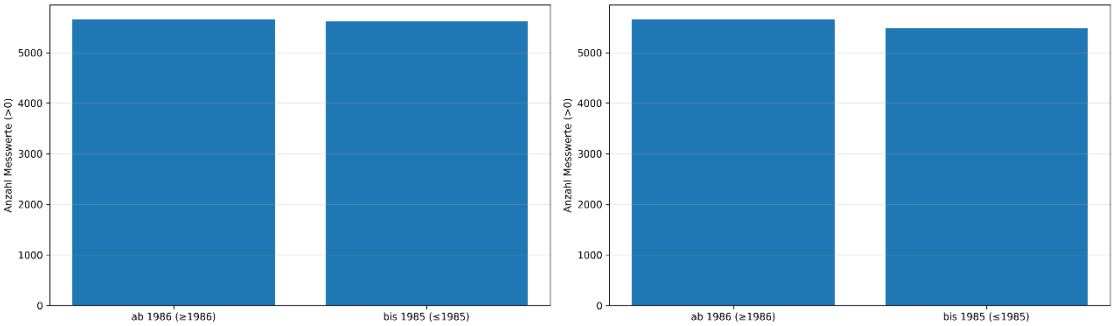


Abbildung 13: Gesamtzahl der in die Analyse einbezogenen Jahresmaxima (ein Wert pro Station und Jahr) vor und nach dem Schnittjahr 1985, jeweils mit (links) und ohne (rechts) Berücksichtigung des Jahres 1981 (eigene Darstellung)

Beim Vergleich um das Schnittjahr 1985 zeigte sich ebenfalls eine höhere Anzahl an in die Analyse einbezogenen Jahresmaxima im jüngeren Zeitraum (vgl. Abbildung 4-10). Dabei handelt es sich nicht um eine Zunahme von Niederschlagsereignissen, sondern ausschließlich um die Anzahl der verfügbaren Messwerte (jeweils ein Jahresmaximum pro Station und Jahr). Die Auswertung dient somit primär der Einordnung der Datengrundlage und verdeutlicht Unterschiede in der Messabdeckung zwischen den Zeiträumen.

Da die Messabdeckung in den 1980er-Jahren bereits weitgehend stabil war, ist der Vergleich methodisch belastbarer als beim Schnittjahr 1980, bleibt jedoch auf die Verfügbarkeit von Daten beschränkt.

Der Einbezug des Jahres 1981 erhöhte die absolute Anzahl geringfügig, veränderte jedoch nicht die grundsätzliche Vergleichbarkeit der beiden Zeiträume. Damit ist sichergestellt, dass die nachfolgende Analyse der Jahreshöchstwerte ≥ 50 mm auf einer vergleichbaren und methodisch belastbaren Datengrundlage basiert.

4.6.4 Jahreshöchstwerte ≥ 50 mm – Schnittjahr 1980

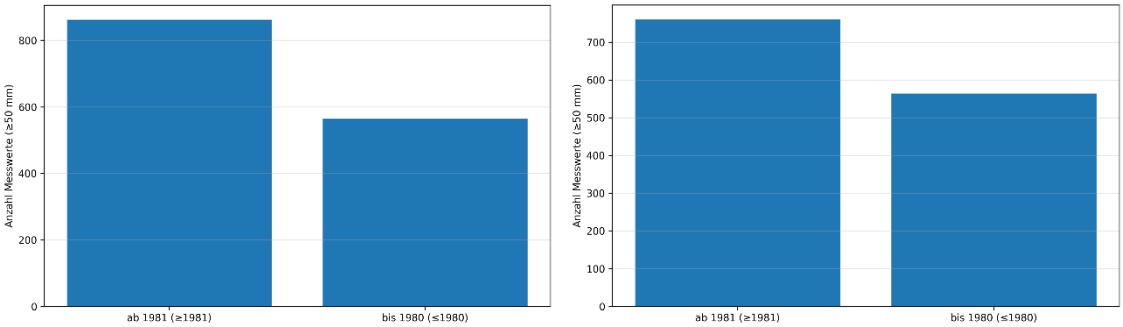


Abbildung 14: Gesamtzahl der Jahreshöchstwerte ≥ 50 mm (ein Wert pro Station und Jahr) vor (≤ 1980) und nach (≥ 1981) dem Schnittjahr 1980, jeweils mit und ohne Berücksichtigung des Jahres 1981 (eigene Darstellung)

Mit Einbezug des Jahres 1981 lag die Anzahl der Jahreshöchstwerte ≥ 50 mm nach 1980 deutlich über dem Niveau davor. Wurde das Jahr 1981 ausgeschlossen, verringerte sich die Ereigniszahl im jüngeren Zeitraum spürbar, blieb jedoch weiterhin höher als im Zeitraum bis 1980 (vgl. Abbildung 4-11). Der Unterschied zwischen den Zeitabschnitten ist daher nicht ausschließlich durch das Extremjahr 1981 erklärbar.

4.6.5 Jahreshöchstwerte ≥ 50 mm – Schnittjahr 1985

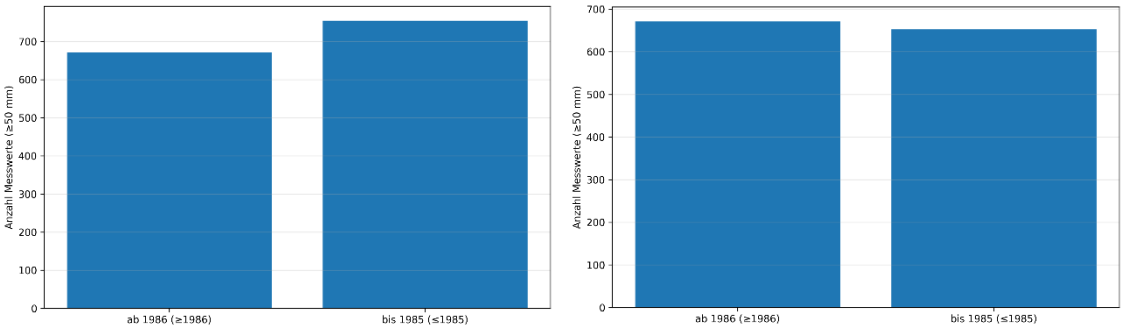
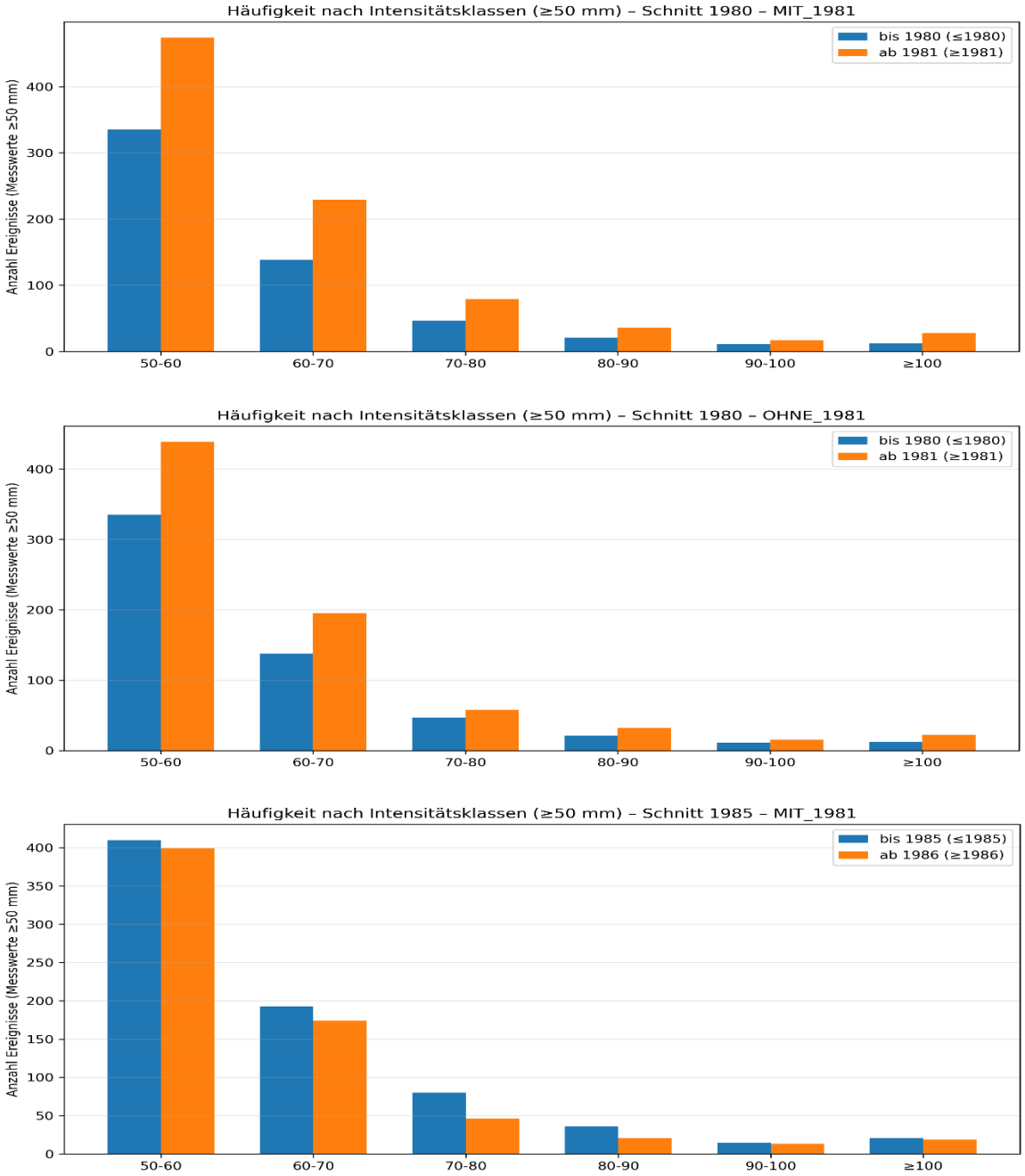


Abbildung 15: Gesamtzahl der Jahreshöchstwerte ≥ 50 mm vor (≤ 1985) und nach (≥ 1986) dem Schnittjahr 1985, jeweils mit (links) und ohne (rechts) Berücksichtigung des Jahres 1981 (eigene Darstellung)

Beim Vergleich am Schnittjahr 1985 zeigte sich eine deutlich höhere Sensitivität gegenüber dem Einbezug des Jahres 1981. Mit Berücksichtigung von 1981 lag die Anzahl der Jahreshöchstwerte ≥ 50 mm im Zeitraum ≤ 1985 über jener nach 1985. Ohne 1981 näherten sich die Ereigniszahlen beider Zeiträume deutlich an; teilweise war im jüngeren Zeitraum sogar eine leicht höhere Anzahl zu verzeichnen (vgl. Abbildung 4-12). Der Vergleich um 1985 wird somit wesentlich durch das Einzeljahr 1981 beeinflusst.

4.6.6 Verteilung nach Intensitätsklassen



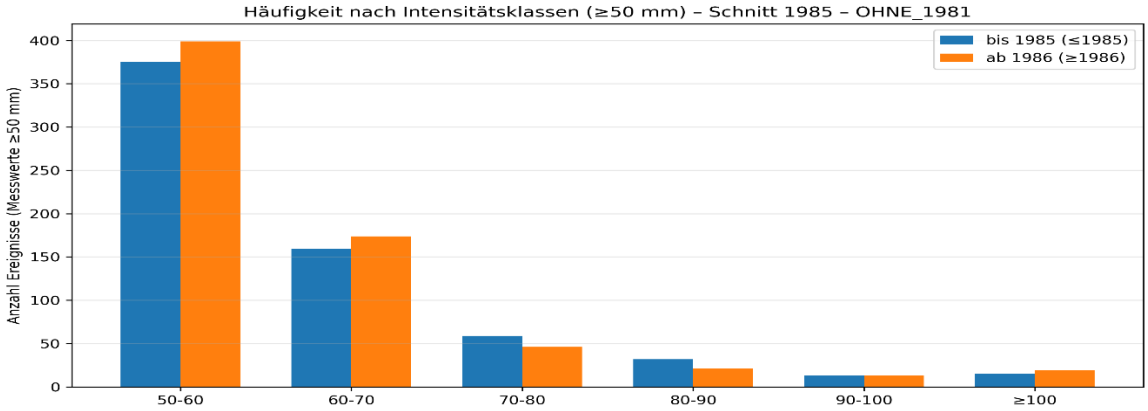


Abbildung 16: Häufigkeit von Jahreshöchstwerten ≥ 50 mm nach Intensitätsklassen im Vergleich vor und nach den Schnittjahren 1980 und 1985, jeweils mit und ohne Berücksichtigung des Jahres 1981 (eigene Darstellung)

Über alle Analysen hinweg dominierten die Klassen 50–60 mm und 60–70 mm. Höhere Intensitätsstufen traten deutlich seltener auf. Beim Schnittjahr 1980 blieb das Muster auch ohne 1981 erhalten: Die Ereignishäufigkeit nach 1980 lag weiterhin über jener davor. Beim Schnittjahr 1985 hingegen zeigte sich, dass insbesondere die unteren Intensitätsklassen im Zeitraum ≤ 1985 stark durch das Jahr 1981 geprägt waren. Ohne dieses Jahr näherten sich die Verteilungen deutlich an.

4.6.7 Zusammenfassende Bewertung des Einflusses des Jahres 1981

Die Sensitivitätsanalyse zeigte:

- Die Messabdeckung nahm im Untersuchungszeitraum deutlich zu und stabilisierte sich ab etwa 1950.
- Der Zusammenhang zwischen der Anzahl der Messwerte und der Anzahl der Jahreshöchstwerte ≥ 50 mm ergibt sich methodisch daraus, dass jede Station pro Jahr genau einen Wert liefert.
- Nach 1980 sind sowohl die Messabdeckung als auch die Anzahl der Jahreshöchstwerte ≥ 50 höher.
- Der Unterschied vor und nach 1980 ist nicht ausschließlich durch 1981 erklärbar.
- Der Vergleich um 1985 wird hingegen stark durch das Einzeljahr 1981 beeinflusst.

Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse, dass Einzeljahre mit außergewöhnlich hohen Extremwerten die Struktur zeitlicher Vergleiche erheblich beeinflussen können. Gleichzeitig bleibt festzuhalten, dass die beobachtete Zunahme der Jahreshöchstwerte ≥ 50 mm nicht allein auf das Jahr 1981 zurückzuführen ist.

5. Diskussion

5.1 Zusammenfassende Einordnung der Hauptergebnisse

Die vorliegende Analyse extremer Tagesniederschläge in Hessen für den Zeitraum 1870 bis 2024 zeigt ein deutlich heterogenes, durch hohe Variabilität geprägtes Muster. Signifikante Trends treten nur punktuell auf, während ein landesweit einheitliches Entwicklungsmuster nicht erkennbar ist. Gleichzeitig zeigt sich eine hohe Sensitivität gegenüber einzelnen Extremjahren.

Diese Ergebnisse stehen im Einklang mit aktuellen Einschätzungen des Deutschen Wetterdienstes, wonach Starkniederschläge in Deutschland durch eine ausgeprägte Variabilität und regionale Unterschiede gekennzeichnet sind und häufig keine eindeutigen Trends nachweisbar sind (DWD, 2025).

Über den gesamten Untersuchungszeitraum hinweg treten außergewöhnlich hohe Tagesniederschläge in unregelmäßigen Abständen auf. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich die Datengrundlage im Zeitverlauf infolge von Veränderungen im Messnetz gewandelt hat. Insgesamt dominieren ausgeprägte interannuelle Schwankungen, durch die einzelne Extremjahre deutlich hervortreten und zeitweise den Eindruck abrupter Veränderungen vermitteln können.

Diese hohe natürliche Variabilität stellt ein charakteristisches Merkmal extremer Niederschlagsereignisse dar und erschwert die eindeutige Identifikation langfristiger systematischer Entwicklungen (Kunz et al., 2024; Weidlich, 2020; Jungandreas, 2018; Fischer, 2021; Schönwiese & Trömel, 2011).

Die stationsbasierte Trendanalyse bestätigt diese räumliche Heterogenität. Nur ein Teil der untersuchten Messstationen weist statistisch signifikante Trends in den maximalen Tagesniederschlagssummen auf, während die Mehrheit keine signifikanten Veränderungen zeigt. Eine flächendeckende, landesweit konsistente Zunahme extremer Tagesniederschläge konnte somit nicht nachgewiesen werden. Stattdessen zeigen sich deutliche stationsspezifische Unterschiede, die auf eine starke lokale Prägung extremer Niederschlagsereignisse hinweisen. Vergleichbare Ergebnisse wurden auch in anderen Untersuchungen für Deutschland beschrieben, in denen signifikante Trends häufig regional begrenzt auftreten (Zimmermann et al., 2002; Willems et al., 2023; Franke, 2009).

Auch räumlich ergibt sich kein geschlossenes Muster. Signifikante Trends treten punktuell und fragmentiert auf, ohne klare Zuordnung zu topographischen Großräumen oder Höhenlagen. Benachbarte Stationen können unterschiedliche Trendrichtungen oder -signifikanzen aufweisen. Dieses Ergebnis entspricht Befunden aus der Literatur, die eine ausgeprägte kleinräumige Variabilität von Starkniederschlägen und deren Trends hervorheben (Hänsel et al., 2015; Homann, 2018; Fischer, 2021; Schönwiese & Trömel, 2011).

Ein vergleichbares Bild ergibt sich aus der Bruchpunktanalyse. Strukturwechsel innerhalb der Zeitreihen lassen sich nur bei einem Teil der Stationen statistisch nachweisen, während bei vielen Stationen keine signifikanten Änderungen identifiziert werden konnten. Eine zeitliche Bündelung der Bruchpunkte ist nicht erkennbar. Insgesamt zeigt sich, dass kontinuierliche Entwicklungen, abrupte Strukturänderungen sowie Zeitreihen ohne nachweisbare systematische Veränderung nebeneinander auftreten. Neuere Untersuchungen weisen darauf hin, dass solche Veränderungen häufig eher durch sprunghafte Strukturänderungen als durch lineare Trends beschrieben werden können (Willems et al., 2023).

Besondere Aufmerksamkeit verdient das Jahr 1981, das eine außergewöhnlich hohe Dichte an Jahreshöchstwerten ≥ 50 mm aufweist. Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass dieses Einzeljahr Periodenvergleiche deutlich beeinflussen kann. Extremjahre können die statistische Struktur von Zeitreihen prägen und die Interpretation von Trends beeinflussen (Hänsel et al., 2015; DWD, 2025; Malitz et al., 2011). Zudem sind solche Jahre häufig durch eine Häufung hochintensiver Ereignisse innerhalb kurzer Zeiträume gekennzeichnet und stehen oft im Zusammenhang mit spezifischen großräumigen Wetterlagen (Miegel, 2011; Homann, 2018; Friederichs et al., 2024).

Die Analyse der Messabdeckung zeigt, dass die Vergleichbarkeit früherer und späterer Zeiträume maßgeblich durch den Ausbau des Messnetzes beeinflusst wird. Während frühe Jahrzehnte aufgrund geringer Stationsdichte nur eingeschränkt belastbar sind, steht ab der Mitte des 20. Jahrhunderts eine deutlich robustere Datengrundlage zur Verfügung. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass Veränderungen in der Messtechnik die Erfassung extremer Niederschlagsintensitäten beeinflussen können. Ältere Messsysteme weisen teilweise eine geringere Auflösung auf, wodurch hohe Intensitäten in früheren Zeiträumen potenziell unterschätzt wurden (Willems et al., 2023).

Die räumliche Einordnung der Stationen mit signifikant positivem Trend in Verbindung mit Fließpfadkarten zeigt zudem, dass sämtliche betrachteten Stationen klar definierbaren lokalen Einzugsgebieten zugeordnet werden können. Kleinräumige topographische Strukturen können dabei zu einer Bündelung des Oberflächenabflusses führen, insbesondere in kleinen Einzugsgebieten sowie entlang von Hang- und Talstrukturen. Dadurch erhalten die klimatologischen Befunde eine zusätzliche räumlich-hydrologische Dimension.

Zusammenfassend zeigt sich, dass die Entwicklung extremer Tagesniederschläge in Hessen durch eine Kombination aus hoher natürlicher Variabilität, lokal begrenzten Trends, vereinzelten Strukturwechseln sowie einer historisch gewachsenen Datengrundlage geprägt ist. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass saisonal gegensätzliche Entwicklungen – etwa zwischen winterlicher Niederschlagszunahme und sommerlichen Abnahmen bei gleichzeitig auftretenden Starkniederschlägen – in ganzjährigen Analysen teilweise überdeckt werden können (Zimmermann et al., 2002; Schönwiese & Trömel, 2011).

5.1.1 Physikalischer Hintergrund und großräumiger Klimakontext

Die Entwicklung extremer Niederschläge steht in engem Zusammenhang mit grundlegenden physikalischen Prozessen des Klimasystems. Deutschland hat sich seit 1881 um etwa 2,5 °C erwärmt, wobei sich die Erwärmung insbesondere seit den 1970er-Jahren deutlich beschleunigt hat (DWD, 2025). Mit zunehmender globaler Erwärmung steigt die Fähigkeit der Atmosphäre, Wasserdampf aufzunehmen. Nach der Clausius-Clapeyron-Beziehung erhöht sich die maximale Wasserdampfaufnahme der Luft um etwa sieben Prozent pro Grad Celsius Temperaturanstieg. Unter geeigneten dynamischen Bedingungen kann dies zu intensiveren Niederschlagsereignissen führen (IPCC, 2021; Schönwiese, 2003; Friederichs et al., 2024; Körner et al., 2022).

Auch regionale Untersuchungen zeigen, dass die zunehmende atmosphärische Feuchteverfügbarkeit insbesondere konvektive Starkregenereignisse begünstigen kann, wobei die Intensivierung stark von lokalen und großräumigen Bedingungen abhängt (Franke, 2009; Körner et al., 2022). Gleichzeitig führt die Erwärmung nicht zwangsläufig zu einer einheitlichen Zunahme der Niederschläge, sondern äußert sich in ausgeprägten regionalen und saisonalen Unterschieden (Schönwiese & Trömel, 2011).

Internationale Syntheseberichte kommen zu dem Ergebnis, dass in vielen Regionen Europas bereits eine Zunahme der Intensität extremer Niederschläge beobachtet wurde und für die Zukunft weitere Intensivierungen wahrscheinlich sind. Gleichzeitig wird betont, dass diese Entwicklungen regional sehr unterschiedlich ausfallen können (IPCC, 2021).

Neben thermodynamischen Effekten spielen auch dynamische Prozesse eine wichtige Rolle. Veränderungen in der atmosphärischen Zirkulation, die Häufigkeit bestimmter Großwetterlagen sowie konvektive Prozesse beeinflussen maßgeblich die Ausbildung extremer Niederschläge (Schönwiese, 2011; Malitz et al., 2011). Studien zeigen, dass Änderungen in der Häufigkeit großräumiger Zirkulationstypen die Intensität und Auftretenswahrscheinlichkeit von Starkniederschlägen wesentlich beeinflussen können (Homann, 2018; Franke, 2009).

Extreme Niederschlagsereignisse entstehen typisch durch stationäre Tiefdrucksysteme oder blockierende Wetterlagen mit langanhaltendem Feuchtenachschub (Friederichs et al., 2024). Diese Kombination aus thermodynamischer Verstärkung und dynamischer Steuerung trägt dazu bei, dass Extremniederschläge zeitlich und räumlich stark variieren.

5.1.2 Empirische Trends extremer Niederschläge in Deutschland

Die nationale Forschungslage zu extremen Niederschlägen in Deutschland zeigt insgesamt ein differenziertes Bild. Langzeituntersuchungen weisen darauf hin, dass sich für extreme Tagesniederschläge keine flächendeckend einheitlichen Trends feststellen lassen. Vielmehr treten signifikante Veränderungen meist regional begrenzt auf, während viele Stationen keine statistisch belastbaren Trends zeigen (Zimmermann et al., 2002; Franke, 2009; Schönwiese & Trömel, 2011; Willems et al., 2023).

Die Ergebnisse stimmen zudem mit aktuellen Beobachtungen des Deutschen Wetterdienstes überein, wonach sich für Starkniederschläge in Deutschland keine einheitlichen Trends zeigen, sondern regionale Unterschiede und hohe Variabilität dominieren. Gleichzeitig deuten neuere Datensätze, insbesondere auf Basis von Radarmessungen, in einigen Regionen auf eine mögliche Zunahme intensiver Niederschläge hin, wobei die statistische Absicherung aufgrund kurzer Zeitreihen derzeit noch eingeschränkt ist (DWD, 2025).

Hydrologische Untersuchungen betonen zudem, dass Extremwertreihen durch eine ausgeprägte natürliche Variabilität gekennzeichnet sind. Diese hohe Variabilität erschwert die statistische Nachweisbarkeit langfristiger Veränderungen, da interannuelle Schwankungen mögliche Trends überlagern können (Willems et al., 2023; Hänsel et al., 2015; Franke, 2009).

Darüber hinaus zeigen Studien, dass Mittelwertentwicklungen und Extremwertentwicklungen nicht gleichgesetzt werden dürfen. Während saisonale Mittelwerte im Sommer teilweise rückläufig sein können, treten gleichzeitig episodisch sehr intensive Starkniederschläge auf, die Trendanalysen stark beeinflussen (Schönwiese & Trömel, 2011; Malitz et al., 2011).

Weiterhin wird darauf hingewiesen, dass Extremereignisse häufig mit bestimmten synoptischen Wetterlagen verbunden sind. Stationäre Tiefdrucksysteme oder konvektive Gewitterlagen können lokal sehr hohe Niederschlagsmengen erzeugen und einzelne Jahre dominieren (Schönwiese, 2016; Homann, 2018; Körner et al., 2022).

Zudem zeigen Untersuchungen, dass die Häufigkeit extremer Niederschlagsereignisse in vielen Fällen stärker zunimmt als deren Intensität, insbesondere im Winterhalbjahr (Malitz et al., 2011). Solche Veränderungen können sich in einer Verschiebung der Extremregime äußern

Insgesamt zeigt der Vergleich mit der nationalen Forschungslage eine hohe Konsistenz der Ergebnisse: Extreme Niederschläge weisen in Deutschland eine starke regionale Differenzierung auf, während flächendeckende Trends nur begrenzt nachweisbar sind.

5.1.3 Einordnung der hessischen Ergebnisse im regionalen Kontext

Die in dieser Arbeit identifizierten Trends und Bruchpunkte extremer Tagesniederschläge zeigen eine ausgeprägte räumliche Heterogenität innerhalb Hessens. Signifikante Trends treten punktuell auf, während benachbarte Stationen häufig keine statistisch nachweisbaren Veränderungen aufweisen. Dieses Muster steht im Einklang mit regionalen Untersuchungen, die eine starke kleinräumige Differenzierung extremer Niederschlagsentwicklungen beschreiben (Homann, 2018; Willems et al., 2023; Fischer, 2021; Jungandreas, 2018; Franke, 2009).

Die räumliche Differenzierung der Ergebnisse entspricht zudem Befunden aus anderen Regionen Deutschlands, in denen komplexe subregionale Trendmuster sowie gegenläufige saisonale Entwicklungen festgestellt wurden (Schönwiese & Trömel, 2011; Zimmermann et al., 2002). Dies unterstreicht, dass eine ganzjährige Betrachtung saisonale Unterschiede nicht abbilden kann.

Hessen ist durch eine komplexe topographische Struktur geprägt, die mehrere Mittelgebirgsräume umfasst, darunter Vogelsberg, Rhön, Taunus, Spessart und Meißner. Orographische Effekte spielen in solchen Regionen eine wichtige Rolle für die Ausbildung und Intensivierung von Niederschlägen. Luftmassen werden an Luvhängen gehoben, wodurch verstärkte Kondensation und lokal erhöhte Niederschlagsmengen entstehen können (Schönwiese, 2011).

Darüber hinaus werden kurzzeitige, konvektive Niederschläge besonders stark von lokalen Bedingungen wie Topographie, Landnutzung und atmosphärischer Stabilität beeinflusst (Franke, 2009). Dies erklärt die Interpretation, dass kleinräumige Unterschiede zwischen benachbarten Stationen prozessbedingt sind. Gleichzeitig können kleinräumige konvektive Starkregenereignisse benachbarte Regionen sehr unterschiedlich betreffen. Gewitterzellen können extreme Niederschläge auf eng begrenzten Flächen verursachen, während wenige Kilometer entfernt deutlich geringere Mengen registriert werden (Willems et al., 2023; HLNUG, 2018; HLNUG, 2023).

Die räumliche Einordnung der Trendstationen in lokale Einzugsgebiete sowie die Analyse von Fließpfadkarten erweitern die klimatologische Betrachtung um eine hydrologische Perspektive. Während die klimatologischen Analysen die zeitliche Entwicklung extremer Niederschläge beschreiben, zeigen die Fließpfade, in welche Richtung potenzieller Oberflächenabfluss vom Stationsstandort aus erfolgen kann. Insbesondere in kleinen Einzugsgebieten kann sich dieser Abfluss schnell bilden und entlang topographischer Strukturen bündeln (Willems et al., 2023).

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass sich die Entwicklung extremer Tagesniederschläge in Hessen nicht durch ein einheitliches landesweites Muster beschreiben lässt. Vielmehr spiegeln sie eine komplexe Wechselwirkung aus klimatischen Veränderungen, regionaler Orographie, synoptischen Wetterlagen, kleinräumigen Niederschlagsprozessen sowie den daraus resultierenden hydrologischen Abflussprozessen wider.

5.2 Methodische Einordnung und Unsicherheiten

Die Analyse extremer Tagesniederschläge über einen langen Zeitraum ist mit verschiedenen methodischen Herausforderungen verbunden, die bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden müssen. Insbesondere die hohe natürliche Variabilität extremer Niederschlagsereignisse, die begrenzte statistische Aussagekraft einzelner Zeitreihen, potenzielle Inhomogenitäten in den Messdaten sowie die Sensitivität gegenüber Einzelereignissen beeinflussen die Belastbarkeit der abgeleiteten Trends und Strukturveränderungen.

Ein zentrales methodisches Problem stellt die Annahme stationärer Verhältnisse dar, die klassischen extremwertstatistischen Verfahren zugrunde liegt. Diese Annahme wird im Kontext des Klimawandels zunehmend hinterfragt, da sich klimatische Rahmenbedingungen und damit auch die statistischen Eigenschaften extremer Niederschläge im Zeitverlauf verändern können (Willems et al., 2023; Körner et al., 2022; Franke, 2009). Vor diesem Hintergrund ist die getrennte Analyse von Trends und Bruchpunkten in der vorliegenden Arbeit als methodisch sinnvoll zu bewerten.

5.2.1 Einfluss von Messmethoden und Datenhomogenität

Langfristige Zeitreihen meteorologischer Messdaten sind häufig von Änderungen im Messnetz, in der Stationsumgebung sowie in der Messtechnik geprägt. Diese Faktoren können zu Inhomogenitäten führen, die sich als scheinbare Trends oder Strukturbrüche in den Daten manifestieren.

Insbesondere der Übergang von analogen zu digitalen Messsystemen kann die Erfassung extremer Niederschlagsintensitäten beeinflussen. Während ältere Messgeräte nur begrenzte Intensitäten registrieren konnten, ermöglichen moderne Systeme eine deutlich präzisere Erfassung hoher Niederschlagsraten. Dadurch besteht die Möglichkeit, dass extreme Werte in früheren Zeiträumen systematisch unterschätzt wurden (Willems et al., 2023).

Zudem können Stationsverlegungen, Veränderungen der Umgebung (z. B. Bebauung oder Vegetation) sowie Anpassungen im Messnetz die Vergleichbarkeit der Daten beeinträchtigen (Körner et al., 2022). Diese potenziellen Einflüsse lassen sich in historischen Datensätzen oft nicht vollständig rekonstruieren, sollten jedoch bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden.

5.2.2 Sensitivität gegenüber Einzeljahren – der Fall 1981

Ein wesentliches Merkmal extremer Niederschlagsreihen ist ihre hohe Sensitivität gegenüber einzelnen außergewöhnlichen Ereignissen. Die Analyse zeigt, dass insbesondere das Jahr 1981 durch eine ungewöhnlich hohe Anzahl und Intensität extremer Tagesniederschläge geprägt ist.

Solche Extremjahre können die statistische Struktur von Zeitreihen erheblich beeinflussen und sowohl Trendanalysen als auch Bruchpunkterkennungen beeinflussen. Einzelne außergewöhnliche Ereignisse können dabei die Anpassung von Extremwertverteilungen dominieren und scheinbare Trends oder Strukturänderungen erzeugen (Malitz et al., 2011).

Darüber hinaus zeigen Studien, dass Extremjahre häufig durch eine Häufung mehrerer Starkniederschlagsereignisse innerhalb kurzer Zeiträume gekennzeichnet sind. Diese Ereignisdichte kann die hydrologische Wirkung erheblich verstärken und gleichzeitig die statistische Bewertung beeinflussen (Miegel, 2011).

Zusätzlich können solche Jahre durch ausgeprägte saisonale Gegensätze geprägt sein, etwa durch trockene Phasen, gefolgt von intensiven Niederschlagsperioden. Diese Kombination verstärkt die Wirkung einzelner Ereignisse und erschwert deren Einordnung in langfristige Entwicklungen (Miegel, 2011).

5.2.3 Hohe natürliche Variabilität extremer Tagesniederschläge

Extreme Niederschlagsreihen sind grundsätzlich durch eine hohe natürliche Variabilität gekennzeichnet. Die Intensität und Häufigkeit extremer Tagesniederschläge unterliegen starken interannuellen Schwankungen, wodurch sich ausgeprägte Unterschiede zwischen einzelnen Jahren ergeben können. Diese Variabilität erschwert die statistische Identifikation langfristiger Trends, da kurzfristige Schwankungen mögliche systematische Entwicklungen überlagern können (Hänsel et al., 2015; Willems et al., 2023; Franke, 2009).

Darüber hinaus zeigt sich, dass Extremniederschläge häufig nicht isoliert auftreten, sondern im Zusammenhang mit bestimmten meteorologischen Rahmenbedingungen stehen. Die Kombination aus großräumigen Zirkulationsmustern, lokalen konvektiven Prozessen sowie orographischen Einflüssen führt zu einer hohen räumlichen und zeitlichen Heterogenität extremer Niederschlagsereignisse.

Insgesamt ist die hohe natürliche Variabilität als zentrales Merkmal extremer Niederschläge zu betrachten, das die Interpretation statistischer Analysen maßgeblich beeinflusst und die Nachweisbarkeit langfristiger Trends begrenzt.

5.2.4 Stationslänge und statistische Aussagekraft

Die Länge der verfügbaren Zeitreihen hat einen wesentlichen Einfluss auf die Aussagekraft statistischer Analysen. Längere Zeitreihen ermöglichen grundsätzlich eine robustere Erfassung langfristiger Entwicklungen und erhöhen die Wahrscheinlichkeit, statistisch signifikante Trends zu identifizieren (Zimmermann et al., 2002).

Gleichzeitig zeigt sich, dass selbst lange Zeitreihen aufgrund der hohen Variabilität extremer Niederschläge keine eindeutigen Trendnachweise gewährleisten. Insbesondere bei kürzeren Zeitabschnitten oder bei Stationen mit lückenhaften Daten ist die Unsicherheit entsprechend erhöht. Darüber hinaus wird in der Literatur betont, dass Veränderungen extremer Niederschläge stark von der betrachteten Dauer abhängen. Während bei sub-täglichen Ereignissen teilweise deutlich stärkere Veränderungen beobachtet werden, sind Entwicklungen bei Tageswerten oft weniger ausgeprägt (Franke, 2009; Körner et al., 2022). Die Fokussierung auf Tagesmaxima ist methodisch gut begründet, bildet jedoch nicht das gesamte Spektrum extremer Niederschlagsprozesse ab.

Zusätzlich wird die Annahme stationärer Extremwertverteilungen zunehmend kritisch betrachtet, da sich klimatische Veränderungen nicht zwangsläufig mit historischen Bemessungsgrundlagen erfassen lassen (Willems et al., 2023; Körner et al., 2022; Miegel, 2011). Dies hat direkte Auswirkungen auf die Interpretation der Ergebnisse und deren Übertragbarkeit auf zukünftige Entwicklungen.

5.2.5 Grenzen der hydrologischen Einordnung

Die vorliegende Arbeit basiert auf der Analyse extremer Tagesniederschläge und deren räumlicher Einordnung mittels Fließpfadkarten. Eine direkte Modellierung hydrologischer Prozesse, wie beispielsweise Abflussbildung oder Überflutungsdynamik, wurde jedoch nicht durchgeführt.

Hydrologische Studien zeigen, dass die Wirkung extremer Niederschläge maßgeblich von zusätzlichen Faktoren abhängt, darunter Bodenfeuchte, Landnutzung, Topographie und Einzugsgebietsgröße (Willems et al., 2023). Insbesondere gesättigte Böden oder versiegelte Flächen können die Abflussbildung deutlich verstärken.

Zudem spielt der Vorzustand des Systems eine entscheidende Rolle. Trockene Böden können zunächst große Wassermengen aufnehmen, während nach Überschreitung der Feldkapazität bereits nachfolgende Niederschläge zu verstärktem Oberflächenabfluss und Grundwasseranstieg führen können (Miegel, 2011).

Die Verwendung von Fließpfadkarten ermöglicht eine qualitative Abschätzung potenzieller Abflusswege, ersetzt jedoch keine detaillierte hydraulische Modellierung. Sie dienen vielmehr als indikatives Instrument zur Identifikation potenziell gefährdeter Bereiche und zur qualitativen Unterstützung der räumlichen Einordnung der klimatologischen Ergebnisse (HLNUG, 2023; HLNUG, o. J.).

5.2.6 Gesamtbewertung der methodischen Einordnung

Zusammenfassend zeigen die methodischen Überlegungen, dass die Interpretation der Ergebnisse durch mehrere zentrale Einflussfaktoren geprägt ist. Die Entwicklung des Messnetzes beeinflusst die Vergleichbarkeit früher und später Zeiträume, während Änderungen in Messtechnik und Datenerfassung zusätzliche Unsicherheiten mit sich bringen können. Darüber hinaus können einzelne Jahre mit außergewöhnlicher Ereignisdichte die statistische Struktur von Zeitreihen und insbesondere Periodenvergleiche erheblich prägen. Gleichzeitig führt die hohe natürliche Variabilität extremer Tagesniederschläge dazu, dass langfristige Trends häufig nur eingeschränkt oder gar nicht statistisch nachweisbar sind.

Vor diesem Hintergrund sind nicht-signifikante Ergebnisse nicht als fehlende Entwicklung zu interpretieren, sondern stellen einen eigenständigen wissenschaftlichen Befund dar. Sie spiegeln die Dominanz natürlicher Schwankungen sowie die Grenzen statistischer Nachweisbarkeit wider.

Die hydrologische Einordnung der Ergebnisse erfolgt bewusst qualitativ und dient der räumlichen Kontextualisierung. Sie ersetzt keine detaillierte Gefahrenanalyse oder hydraulische Modellierung, liefert jedoch wichtige Hinweise auf potenzielle Abflussprozesse und Gefährdungsschwerpunkte.

Insgesamt sind die Ergebnisse dieser Arbeit als robuste, stationsbasierte Befunde zu verstehen, deren Interpretation stets im Kontext der dargestellten methodischen Rahmenbedingungen erfolgen muss.

5.3 Anwendungsbezug und praktische Relevanz

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit besitzen eine unmittelbare Relevanz für die wasserwirtschaftliche Praxis, insbesondere im Kontext der Starkregenvorsorge, der Gefährdungsabschätzung sowie der Planung und Bewertung technischer Infrastrukturen. Auch wenn keine flächendeckenden, statistisch signifikanten Trends extremer Tagesniederschläge nachgewiesen werden konnten, ergeben sich aus der Kombination von punktuellen Trends, hoher Variabilität und hydrologischer Einordnung wichtige Hinweise für den Umgang mit Starkregenrisiken.

Zentral ist dabei die Erkenntnis, dass die Relevanz extremer Niederschläge nicht allein aus langfristigen Trends abgeleitet werden kann. Vielmehr spielen auch die Intensität einzelner Ereignisse, deren Häufigkeit sowie deren räumliche Einbettung eine entscheidende Rolle für die Gefährdungsbewertung. Starkniederschläge bilden eine wesentliche Grundlage für die Dimensionierung wasserwirtschaftlicher Anlagen und beeinflussen unmittelbar die Auslegung von Entwässerungssystemen sowie Hochwasserschutzmaßnahmen (Malitz et al., 2011).

5.3.1 Punktuelle Trends und lokale Verwundbarkeit

Die in dieser Arbeit identifizierten signifikanten Trends treten ausschließlich punktuell auf und zeigen keine flächendeckende räumliche Struktur. Dennoch können gerade diese lokal begrenzten Veränderungen eine hohe praktische Relevanz besitzen. Insbesondere in Bereichen mit sensibler Infrastruktur oder ungünstigen topographischen Bedingungen können bereits moderate Veränderungen extremer Niederschläge zu einer erhöhten Gefährdung führen.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Bewertung von Starkregenrisiken nicht auf großräumige Mittelwerte gestützt werden sollte. Vielmehr ist eine differenzierte Betrachtung einzelner Standorte erforderlich, da lokale Entwicklungen maßgeblich für die tatsächliche Gefährdungssituation sind. Dies gilt insbesondere für kritische Infrastrukturen wie Krankenhäuser, Pflegeeinrichtungen oder Verkehrsknotenpunkte, die auf eine hohe Funktionssicherheit angewiesen sind.

5.3.2 Hydrologische Relevanz der Stationslage

Die Kombination der klimatologischen Analyse mit der räumlichen Einordnung der Stationen zeigt, dass alle untersuchten Standorte in klar definierbare lokale Einzugsgebiete eingebunden sind. Die Fließpfadkarten verdeutlichen, in welche Richtung potenzieller Oberflächenabfluss bei Starkniederschlägen erfolgen kann.

Hydrologische Untersuchungen zeigen, dass nicht allein die Gesamtniederschlagsmenge, sondern insbesondere die Intensität und Dauer extremer Ereignisse entscheidend für die Abflussbildung sind (Franke, 2009; Miegel, 2011). Tagesniederschläge können dabei bereits ein erhebliches Gefährdungspotenzial aufweisen, insbesondere wenn innerhalb kurzer Zeit hohe Niederschlagsmengen auftreten.

Kleinräumige topographische Strukturen können den Oberflächenabfluss bündeln und zu einer schnellen Konzentration von Wasser führen. Dies gilt insbesondere für Hanglagen, Senken und kleine Einzugsgebiete, die bei Starkniederschlägen besonders sensibel reagieren (Willems et al., 2023).

5.3.3 Bedeutung nicht-signifikanter Trends für die Praxis

Die räumliche Analyse zeigt, dass potenzielle Abflussbahnen häufig direkt auf Siedlungsbereiche oder Infrastruktureinrichtungen zulaufen. Starkniederschläge können daher auch außerhalb klassischer Flussauen zu erheblichen Schäden führen.

Praxisbeispiele zeigen, dass technische Entwässerungssysteme, Vorfluter und lokale Engstellen bei intensiven oder gehäuften Niederschlagsereignissen überlastet werden können. Besonders kritisch sind dabei Situationen, in denen mehrere Starkregenereignisse innerhalb kurzer Zeiträume auftreten oder langanhaltende Niederschlagsphasen vorliegen (Miegel, 2011).

Die Ergebnisse unterstreichen, dass die Gefährdung durch Starkregen nicht ausschließlich an Gewässer gebunden ist, sondern sich häufig aus oberflächennahen Abflussprozessen ergibt. Dies erfordert eine Erweiterung klassischer Hochwasserbetrachtungen hin zu einer integrierten Starkregenvorsorge.

5.3.5 Gesamtbewertung der anwendungsbezogenen Bedeutung

Ein zentrales Ergebnis der Arbeit ist, dass an vielen Stationen keine statistisch signifikanten Trends nachweisbar sind. Dies darf jedoch nicht als Hinweis auf eine fehlende Relevanz extremer Niederschläge interpretiert werden. Die hohe natürliche Variabilität sowie die Dominanz einzelner Starkniederschlagsereignisse führen dazu, dass Veränderungen häufig statistisch nicht eindeutig erfassbar sind. Gleichzeitig können bereits einzelne außergewöhnliche Ereignisse erhebliche Schäden verursachen.

Darüber hinaus wird die Annahme stationärer Extremwertverteilungen zunehmend kritisch betrachtet. Klimatische Veränderungen können dazu führen, dass historische Bemessungswerte zukünftige Risiken unterschätzen (Franke, 2009; Körner et al., 2022; Miegel, 2011). Dies hat direkte Auswirkungen auf die Planung und Dimensionierung wasserwirtschaftlicher Anlagen.

Vor diesem Hintergrund ist es erforderlich, auch bei fehlenden Trends eine vorsorgeorientierte und adaptive Planung zu verfolgen und Unsicherheiten in der Gefährdungsbewertung systematisch zu berücksichtigen. Die Ergebnisse unterstreichen die Notwendigkeit, Starkregen als eigenständiges Gefährdungsphänomen in der wasserwirtschaftlichen Planung systemisch zu berücksichtigen.

6. Fazit

Ziel der vorliegenden Arbeit war die Analyse der zeitlichen Entwicklung extremer Tagesniederschläge in Hessen im Zeitraum von 1870 bis 2024 sowie deren Einordnung in einen räumlich-hydrologischen Kontext. Die Ergebnisse zeigen, dass extreme Niederschläge durch eine ausgeprägte natürliche Variabilität geprägt sind und keine flächendeckend einheitlichen Trends nachgewiesen werden können. Stattdessen treten signifikante Veränderungen ausschließlich punktuell auf, während der Großteil der untersuchten Stationen keine statistisch belastbaren Trends aufweist.

Die Analyse verdeutlicht, dass einzelne Extremjahre die statistische Struktur von Zeitreihen maßgeblich beeinflussen können und somit eine hohe Sensitivität gegenüber außergewöhnlichen Ereignissen besteht.

Gleichzeitig zeigen sich sowohl kontinuierliche Entwicklungen als auch abrupte Strukturänderungen, was die Komplexität der zeitlichen Dynamik extremer Niederschläge unterstreicht. Die Ergebnisse stehen im Einklang mit der aktuellen Forschung, die für Deutschland insgesamt eine hohe räumliche Heterogenität und begrenzte Nachweisbarkeit flächendeckender Trends beschreibt.

Methodisch wird deutlich, dass die Untersuchung extremer Niederschläge mit Unsicherheiten verbunden ist. Insbesondere die Annahme stationärer Verhältnisse ist kritisch zu betrachten, da klimatische Veränderungen sowie technische Entwicklungen in der Messdatenerhebung die Vergleichbarkeit historischer Zeitreihen beeinflussen können. Darüber hinaus erschwert die hohe natürliche Variabilität eine eindeutige statistische Einordnung langfristiger Entwicklungen.

Die räumliche Einordnung der Trendstationen zeigt, dass extreme Niederschläge stets in lokale Einzugsgebiete eingebettet sind und ihre Wirkung wesentlich durch topographische und hydrologische Rahmenbedingungen bestimmt wird. Kleinräumige Strukturen können dabei zu einer Bündelung des Oberflächenabflusses führen und somit die Gefährdungssituation lokal erheblich verstärken.

Für die Praxis ergibt sich daraus, dass Starkregenrisiken nicht ausschließlich auf Grundlage langfristiger Trendanalysen bewertet werden können. Vielmehr ist eine differenzierte, standortspezifische Betrachtung erforderlich, die sowohl klimatologische als auch hydrologische Faktoren berücksichtigt. Auch bei fehlenden statistisch signifikanten Trends bleibt die Relevanz extremer Niederschläge hoch, da einzelne Ereignisse bereits erhebliche Auswirkungen auf Infrastruktur und Siedlungsräume haben können.

Zusammenfassend zeigt die Arbeit, dass die Entwicklung extremer Tagesniederschläge in Hessen durch ein komplexes Zusammenspiel aus klimatischen Veränderungen, natürlicher Variabilität, regionalen Einflüssen und methodischen Rahmenbedingungen geprägt ist. Die gewählte Kombination aus Zeitreihenanalyse und räumlicher Einordnung stellt dabei einen geeigneten Ansatz dar, um sowohl wissenschaftliche Fragestellungen als auch praktische Anforderungen der Starkregenvorsorge zu adressieren.

Für zukünftige Untersuchungen ergibt sich insbesondere die Notwendigkeit, sub-tägliche Niederschlagsdaten stärker zu berücksichtigen, die Kopplung mit atmosphärischen Zirkulationsmustern zu vertiefen sowie hydrodynamische Modellierungen zur genaueren Abschätzung von Abflussprozessen einzubeziehen.

7. Literaturverzeichnis

Auer, H., Bliefernicht, J., Seidel, J., Kunstmann, H., & Demuth, N. (2019). Evaluierung hochaufgelöster Ensemble-Niederschlagsvorhersagen für die Hochwasserfrühwarnung in kleinräumigen Flussgebieten am Beispiel der Starkregenperiode 2016 in Deutschland. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 63(3), 130-146. https://doi.bafg.de/HyWa/2019/HyWa_2019.3_1.pdf

Deutscher Wetterdienst (DWD). (2023). Klimastatusbericht Deutschland 2023. https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimastatusbericht/publikationen/ksb_2023.pdf

Deutscher Wetterdienst (DWD). (2025). Was wir über Extremwetter in Deutschland wissen. https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/aktuelle_meldungen/250924/faktenpapier_extremwetterkongress.html

European Environment Agency (EEA). (2020). Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016–2020: An indicator-based report. Publications Office of the European Union. https://www.eea.europa.eu/publications/soer-2020

Fischer, G. (2021). Die räumliche und zeitliche Niederschlagsverteilung in Abhängigkeit von Wetterlagen in Österreich (Bachelorarbeit). Universität Graz. https://unipub.uni-graz.at/obvugrhs/download/pdf/6050079

Franke, J. (2009). Risiken des Klimawandels für den Wasserhaushalt – Variabilität und Trend des zeitlichen Niederschlagsspektrums. Technische Universität Dresden. https://tud.qucosa.de/en/api/qucosa%3A25649/attachment/ATT-0/

Friederichs, P., Grieger, J., Kunz, T., Ulbrich, U., Bürger, G., Buschow, S., & Vorogushyn, S. (2024). Ergiebige Dauerniederschläge und Hochwasser in Süddeutschland im Mai und Juni 2024. https://refubium.fu-berlin.de/handle/fub188/44298

Hänsel, S., Schucknecht, A., Böttcher, F., Bernhofer, C., & Matschullat, J. (2015). Niederschlagsveränderungen in Sachsen von 1901 bis 2100: Starkniederschlags- und Trockenheitstrends. https://refubium.fu-berlin.de/bitstream/handle/fub188/18676/246_pdf.pdf

Held, I. M., & Soden, B. J. (2006). Robust responses of the hydrological cycle to global warming. Journal of Climate, 19(21), 5686–5699. https://doi.org/10.1175/JCLI3990.1

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG). (2018). Starkregen in Hessen – v5 Einzelblatt. https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/klima/klimprax/starkregen/x2_starkregen-v3Einzelblatt.pdf

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG). (2023). Schäden durch Starkregen vermeiden. https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/klima/klimprax/starkregen/Schaeden-durch-Starkregen-vermeiden2023.pdf

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG). (2024). Klimawandel in Hessen – Klimareport. https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/klima/Klimareport_Hessen_2024.pdf

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG). (o. J.). KLIMPRAX Starkregen. https://www.hlnug.de/themen/klimawandel-und-anpassung/projekte/klimprax-projekte/klimprax-starkregen

Homann, M. (2018). Auswirkungen des Klimawandels auf atmosphärische Zirkulationstyphäufigkeiten und starke Gebietsniederschläge im südlichen Mitteleuropa (Dissertation). Universität Augsburg. https://opus.bibliothek.uniaugsburg.de/opus4/frontdoor/deliver/index/docId/38103/file/homann_Diss.pdf

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). Climate change 2021: The physical science basis. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/

Jonas, M., Staeger, T., & Schönwiese, C. D. (2005). Probability assessment for the incidence of extreme events due to climatic change. https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/21252410

Jungandreas, A. (2018). Automatisierte Datenanalyse von Klimadaten am Beispiel der Klimaveränderung in Deutschland bis 2070 (Diplomarbeit). Westsächsische Hochschule Zwickau. https://libdoc.whz.de/opus4/frontdoor/deliver/index/docId/10932/file/Diplomarbeit_Anne_Jungandreas.pdf

Körner, P., Vorobevskii, M. S. I., Kronenberg, R., & Homoudi, M. S. A. (2022). Klima-Referenzdatensatz Sachsen 1961–2020. https://slub.qucosa.de/api/qucosa%3A79971/attachment/ATT-0/?L=1

Kunz, M., Karremann, M. K., & Mohr, S. (2024). Auswirkungen des Klimawandels auf Starkniederschläge, Gewitter und Schneefall. In Klimawandel in Deutschland: Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven (S. 73–84). Springer. https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-662-66696-8_7.pdf

Malitz, G., Beck, C., & Grieser, J. (2011). Veränderung der Starkniederschläge in Deutschland. In Warnsignal Klima – genug Wasser für alle? (S. 311–316). https://opus.bibliothek.uni-augsburg.de/opus4/frontdoor/deliver/index/docId/41980/file/41980.pdf

Miegel, K. (2011). Niederschlagsereignisse in Mecklenburg-Vorpommern im Sommer 2011. Schriftenreihe Umweltingenieurwesen, 31, 147–166. https://www.uni-rostock.de/storages/uni-rostock/Alle_AUF/AUF/HY/Niederschlaege-Sommer-2011-Miegel.pdf

Schönwiese, C. D. (2003). Jahreszeitliche Struktur beobachteter Temperatur- und Niederschlagstrends in Deutschland. Beiträge zur Klima- und Meeresforschung, 59–68. https://doi.org/10.15495/EPub_UBT_00006610

Schönwiese, C. D., & Trömel, S. (2011). Langzeitänderungen des Niederschlags in Deutschland. https://www.ferrybox.org/imperia/md/content/csc/warnsignalklima/Warnsignal_Klima_Kap3.1_3.1.6_Scho__nwiese.pdf

Schönwiese, C. D. (2016). Witterungs- und Klimaextreme. In Annaberger Klimatage 2016. https://d-nb.info/1114739634/34

Umweltbundesamt (UBA). (2023). *Monitoringbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel 2023.* https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/monitoringbericht-2023

Weidlich, S. (2020). Beobachtbare Klimaänderungen. In Anpassung an die Folgen des Klimawandels (S. 20).

Willems, W., Stockel, H., Haberlandt, U., Shehu, B., Junghänel, T., Ostermöller, J., & Deutschländer, T. (2023). Betrachtungen zur Instationarität extremer Niederschläge in Deutschland. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 67*(3), 151–159. https://doi.bafg.de/HyWa/2023/HyWa_2023.3_2.pdf

Zimmermann, L., Bartels, H., Dietzer, B., & Albrecht, F. M. (2002). Langzeitverhalten von Starkniederschlägen in Süddeutschland. Klimastatusbericht. https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/service/dateien/langzeitverhalten_von_starkniederschlaegen.pdf

Anhang

Anhang A: Top-10-Jahre extremer Tagesniederschläge

Zur Einrodnung besonders ereignisreicher Jahre wurde ein Rankig der zehn Jahre mit der höchsten Häufigkeit intensiver Tagesniederschläge erstellt. Grundlage hierfür ist die Anzahl der Überschreitungen definierter Schwellenwerte ((≥50 mm, ≥ 70 mm, ≥ 75 mm, ≥ 100 mm und ≥ 125 mm) pro Jahr über alle verfügbaren Stationen.
Die Tabelle A-1 zeigt die entsprechenden Jahre sowie die jeweilige Anzahl der Schwellenüberschreitungen. Zusätzlich wurde ein aggregierter Score berechnet, der sich aus der gewichteten Berücksichtigung der verschiedenen Intesitätsstufen ergibt und eine vergleichende Einordnung besonders niederschlagsintensiver Jahre ermöglicht.

Jahr	50 mm	70 mm	75 mm	100 mm	125 mm	Score
1981	102	33	21	6	0	174
1965	37	12	10	7	1	85
2019	51	13	8	1	1	80
1982	41	18	14	2	0	79
2002	45	10	7	2	0	68
2017	53	4	3	1	1	68
1956	34	11	8	2	0	59
1984	38	10	7	1	0	58
1994	27	9	8	2	1	55
1947	27	11	7	1	0	48

Tabelle A1:Ranking der zehn Jahre mit der höchsten Häufigkeit intensiver Tagesniederschläge basierend auf Schwellenwertüberschreitungen und aggregiertem Score (eigene Darstellung)

Anhang B: Trendanalyse auf Stationsebene

Zur detaillierten Darstellung der Trendanalyse sind in Tabelle B-1 alle untersuchten Stationen mit ihren geographischen Koordinaten sowie den Ergebnissen der Trendtests aufgeführt.
Die in Tabelle B-1 dargestellten Ergebnisse umfassen für jede Station die Trendanalyse der jährlichen maximalen Tagesniederschläge. Die Spalte *Status* gibt die Qualität bzw. Verwendbarkeit der Zeitreihe (OK= vollständige und für die Analyse geeignete Datenreihe) an. *Trend* beschreibt die Richtung des Trendes (z.B. „no trend“, „increasing“, „decreasing“) basierend auf dem durchgeführten Testverfahren. Die Trendanalyse basiert auf dem Mann-Kendall-Test in Kombination mit der Sen's slope-Schätzung. Der *p-Wert* gibt die statistische Signifikanz des Trendes an. *Sen's slope* beschreibt die Stärke des Trens als mediane Änderungsrate pro Jahr. Die Spalten breite und länge enthalten die geographischen Koordinaten der jeweiligen Station.

station	Status	Trend	p-Wert	Sen's slope	breite	laenge
Frankfurt_Main-Stadt	OK	no trend	0.617852	0.009677	50.1267	8.6692
Biedenkopf-Wallau	OK	no trend	0.35751	0.019526	50.9275	8.4935
Greifenstein	OK	no trend	0.686694	0.011727	50.6217	8.2927
Wiesbaden-Biebrich	OK	no trend	0.22489	0.024528	50.0419	8.2333
Hofbieber-Elters	OK	no trend	0.159604	0.042751	50.5783	9.8833
Geisenheim	OK	no trend	0.844504	-0.00667	49.9858	7.9547
Neukirchen-Hauptschwenda	OK	no trend	0.874686	0.007143	50.8922	9.4053
Twistetal-Muhlhausen	OK	no trend	0.111121	-0.06016	51.3343	8.9132

Arolsen-Landau	OK	no trend	0.095659	-0.06475	51.3429	9.077
Bad_Camberg	OK	no trend	0.43192	-0.03241	50.2863	8.2949
Bad_Homburg	OK	no trend	0.482932	0.027843	50.2541	8.5748
Bad_Soden-Salmuster	OK	no trend	0.92897	0.004651	50.2688	9.36
Bad_Vilbel-Dortelweil	OK	no trend	0.217704	-0.05085	50.2138	8.7446
Braunfels	OK	no trend	0.96092	0	50.5228	8.3978
Diemelsee-Rhenegge	OK	no trend	0.201916	-0.06291	51.3612	8.7673
Driedorf	OK	no trend	0.506818	0.023861	50.6316	8.1813
Ebsdorfergrund-Ebsdorf	OK	no trend	0.492059	0.027386	50.735	8.813
Frankenau	OK	no trend	0.186503	0.051191	51.0894	8.935
Freigericht-Altenmittlau	OK	no trend	0.084654	-0.08	50.1412	9.137
Frielendorf-Verna	OK	no trend	0.221845	0.049057	51.0003	9.3325
Gedern-Schonhausen	OK	no trend	0.735889	-0.01471	50.4035	9.2064
Grebenau-Reimenrod	OK	no trend	0.085393	0.093864	50.7431	9.4232
Haunetal-Wehrda	OK	no trend	0.86255	0.005882	50.7383	9.6608
Herleshausen-Archfeld	OK	no trend	0.610837	0.022727	51.0423	10.1471
Hofheim_Taunus	OK	no trend	0.620013	-0.02247	50.0802	8.4346
Hohenstein-Breithardt	OK	no trend	0.051628	-0.08248	50.1919	8.088
Idstein	OK	no trend	0.53041	-0.027	50.2167	8.2667
Knullwald-Niederbeisheim	OK	no trend	0.843526	0.014773	51.043	9.5232
Korbach-Rhena	OK	no trend	0.234628	-0.05823	51.288	8.7928
Lautertal-Meiches	OK	no trend	0.742465	0.01428	50.6223	9.2561
Lich	OK	no trend	0.936464	-0.00243	50.5131	8.8051
Liebenau-Haueda	OK	no trend	0.507819	0.034211	51.4881	9.25
Mainhausen-Zellhausen	OK	no trend	0.977753	0	50.0147	8.9708
Mengerskirchen	OK	no trend	0.282107	-0.04401	50.5658	8.1567
Naumburg-Altenstadt	OK	no trend	0.868847	-0.00685	51.2748	9.1995
Neustadt	OK	increasing	0.000212	0.127889	50.8494	9.1253
Nidderau-Erbstadt	OK	no trend	0.762867	0.012903	50.2741	8.8653
Petersberg-Marbach	OK	no trend	0.358178	-0.03077	50.6175	9.725
Pohlheim-Hausen	OK	no trend	0.375516	0.037868	50.5463	8.7404
Reinhardshagen-Vaake	OK	no trend	0.705585	0.015154	51.4837	9.6128
Rodermark-Ober-Roden	OK	no trend	0.391577	-0.02945	49.9832	8.8395
Rotenburg-Braach	OK	no trend	0.307765	0.053836	51.0031	9.6988
Schenklengsfeld-Wustfeld	OK	no trend	0.768014	-0.0125	50.8209	9.8106
Schwalmstadt-Ascherode	OK	increasing	0.008042	0.094545	50.9033	9.2129
Staufenberg-Treis	OK	no trend	0.175681	0.058683	50.6667	8.7833
Volkmarsen	OK	no trend	0.171322	0.058333	51.414	9.1164
Wabern-Hebel	OK	no trend	0.95906	0	51.0673	9.3822
Wachtersbach	OK	no trend	0.430394	0.033333	50.2435	9.2893
Waldeck-Alraft	OK	no trend	0.084775	-0.06957	51.2428	8.9714
Weilmunster	OK	no trend	0.120182	0.06813	50.4284	8.3806
Weilrod-Niederlauken	OK	no trend	0.720421	0.019149	50.3467	8.4333
Wetter_Hessen-Amonau	OK	no trend	0.091896	-0.05465	50.9073	8.6929
Kleiner_Feldberg_Taunus	OK	no trend	0.085506	0.087228	50.2219	8.4469
Beerfelden	OK	no trend	0.573286	-0.03115	49.5617	8.9678
Amoneburg-Rudigheim	OK	no trend	0.443209	0.035505	50.784	8.9545

Bad_Schwalbach-Langenseifen	OK	no trend	0.154088	0.077778	50.1219	8.0363
Bad_Sooden-Allendorf	OK	no trend	0.723095	0.022654	51.2801	9.9849
Bad_Sooden-Allendorf	OK	no trend	0.723095	0.022654	50.2138	8.7446
Battenberg-Berghofen	OK	no trend	0.347656	0.038333	51.0031	8.6692
Biblis	OK	no trend	0.745865	-0.02026	49.6895	8.4182
Dieburg	OK	no trend	0.189186	-0.06167	49.8978	8.849
Diemelstadt-Rhoden	OK	no trend	0.378955	-0.05352	51.4743	9.0039
Espenau-Monchehof	OK	no trend	0.468522	-0.03846	51.3945	9.4606
Gernsheim	OK	decreasing	0.020079	-0.13423	49.7611	8.4876
Grasellenbach-Hammelbach	OK	no trend	0.495388	-0.05	49.6387	8.8361
Grebenhain	OK	no trend	0.679636	-0.02639	50.4876	9.3322
Grebenstein	OK	no trend	0.413926	-0.03692	51.4498	9.4131
Gross-Gerau-Wallerstadten	OK	no trend	0.361203	-0.05	49.9052	8.4459
Grunberg_Hessen	OK	no trend	0.956108	0.002326	50.5926	8.9618
Kefenrod-Bindsachsen	OK	no trend	0.512288	-0.038	50.35	9.1674
Messel	OK	decreasing	0.022436	-0.1	49.9382	8.7452
Muhlheim_Main	OK	no trend	0.641943	0.018983	50.1294	8.8209
Munzenberg-Gambach	OK	increasing	0.028306	0.0975	50.4521	8.7318
Ranstadt-Ober-Mockstadt	OK	no trend	0.485913	0.035484	50.3489	8.9633
Ronneburg-Huttengesass	OK	no trend	0.261909	0.06306	50.2092	9.0378
Steinau-Ulmbach	OK	no trend	0.172735	0.077778	50.37	9.4244
Waldems-Reinborn	OK	no trend	0.169998	0.077778	50.2597	8.36
Bad_Nauheim	OK	no trend	0.577369	0.030577	50.3575	8.7506
Dillenburg	OK	no trend	0.870244	0.014894	50.7311	8.2619
Giessen	OK	no trend	0.153226	0.058824	50.6014	8.6439
Schluchtern-Herolz	OK	no trend	0.399244	-0.04911	50.3442	9.5536
Tann_Rhon	OK	no trend	0.377289	0.05	50.6389	10.0228
Wasserkuppe_Rhon	OK	no trend	0.080564	0.121739	50.4972	9.9428
Eschwege	OK	no trend	0.402504	-0.04615	51.1833	10.0636
Bad_Hersfeld	OK	no trend	0.300149	0.06	50.8517	9.7378
Colbe	OK	no trend	0.850732	0.007692	50.8489	8.7733
Frankfurt_Main-Flughafen	OK	no trend	0.35085	-0.04597	50.0447	8.5978
Schotten	OK	no trend	0.830977	-0.01786	50.4925	9.1228
Melsungen-Burstoss	OK	no trend	0.502753	-0.04091	51.1318	9.5189
Gilserberg-Moischeid	OK	no trend	0.79205	-0.01429	50.965	9.0492
Michelstadt	OK	no trend	0.966496	-0.00385	49.6689	9.0111
Bad_Zwesten	OK	no trend	0.561206	-0.04444	51.0547	9.1682
Battenberg-Hof_Karlsburg	OK	no trend	0.753274	0.023166	51.0662	8.5373
Florsbachtal-Florsbach	OK	increasing	0.018939	0.15	50.1344	9.4083
Gladenbach	OK	no trend	0.144996	0.074265	50.7671	8.5854
Heringen_Werra	OK	no trend	0.075099	0.123232	50.8951	10.0111
Kaufungen-Niederkaufungen	OK	no trend	0.209267	0.09	51.2857	9.6025
Kirtorf	OK	no trend	0.177768	0.088889	50.7705	9.1017
Lampertheim-Neuschloss	OK	no trend	0.070176	-0.11273	50.7705	9.107
Langgons-Niederkleen	OK	no trend	0.519319	0.044522	50.4839	8.6028

Neuenstein-Muhlbach	OK	no trend	0.483878	0.044866	50.9309	9.5592
Niederaula	OK	no trend	0.225653	0.1	50.799	9.6123
Ottrau-Immichenhain	OK	increasing	0.010275	0.166667	50.81	9.3581
Rasdorf	OK	no trend	0.699163	-0.0295	50.7153	9.8992
Reichelsheim_Odenwald	OK	no trend	0.345829	-0.0862	49.7081	8.8561
Reinheim	OK	no trend	0.819521	-0.01481	49.8245	8.824
Trendelburg	OK	no trend	0.580603	0.032796	51.5776	9.4336
Waldbrunn-Lahr	OK	no trend	0.850373	0.011538	50.5121	8.1326
Waldkappel-Schemmern	OK	no trend	0.118576	0.115385	51.1137	9.8157
Witzenhausen-Ziegenhagen	OK	no trend	0.544451	-0.04028	51.3645	9.749
Wohratal	OK	no trend	0.083403	0.111111	50.9305	8.9474
Burgwald-Bottendorf	OK	no trend	0.258176	0.092157	51.0306	8.8144
Fulda	OK	no trend	0.734064	-0.01786	50.5347	9.6761
Wahlsburg-Lippoldsberg	OK	no trend	0.489693	-0.06485	51.6183	9.5758
Sontra	OK	no trend	0.612659	-0.06246	51.0606	9.9264
Hohenahr_Leiterhof	OK	no trend	0.529619	-0.03614	50.6604	8.5235
Weiterstadt-Schneppenhausen	OK	no trend	0.189154	-0.1	49.9298	8.5768
Rudesheim-Presberg	OK	no trend	1	0	50.0516	7.8877
Wolfhagen-Wenigenhasungen	OK	no trend	0.553194	-0.07368	51.3326	9.2503
Eibelshausen	OK	no trend	0.200305	0.2725	50.8048	8.33774
Orlen	OK	no trend	0.826	-0.02703	50.1787	8.18487
Bebra	OK	no trend	0.052985	0.214737	50.9732	9.78229
Biebesheim	OK	no trend	0.241396	0.2	49.7778	8.45721
Kirchhain	OK	no trend	0.067078	0.217633	50.8155	8.91538
Krofdorf	OK	no trend	0.086249	-0.17744	50.6699	8.6234
Marburg	OK	no trend	0.111619	0.121259	50.8014	8.80774
Kassel_Schauenburg	OK	no trend	0.354273	-0.1	51.2963	9.4424
Mademuhlen	OK	no trend	0.947155	-0.00379	50.6178	8.14707
Raunheim	OK	no trend	0.622476	0.041667	50.0056	8.4291
Rengershausen	OK	no trend	0.116949	0.173292	51.1055	8.70797
Selters_Taunus-Niederselters	OK	no trend	0.791756	-0.04444	50.3361	8.2228
Vohl-Buchenberg	OK	no trend	0.236715	0.120833	51.1598	8.874
Alsfeld-Eifa	OK	no trend	0.199938	0.176136	50.7447	9.345
Giegenberg	OK	no trend	0.064478	0.313	50.5302	9.87113
Hochwaldhausen	OK	no trend	0.095146	-0.29904	50.5154	9.31252
Freiensteinau	OK	no trend	0.20917	-0.21152	50.4259	9.40003
Glaserzell	OK	no trend	0.696429	0.064444	50.5736	9.64055
Meiches	OK	no trend	0.989565	0.001769	50.6281	9.26143
Schaafheim-Schlierbach	OK	no trend	0.801683	0.028571	49.9195	8.9671
Asslar_Klein-Altenstadten	OK	no trend	0.142775	-0.13333	50.5799	8.4682
Beberbeck	OK	no trend	0.33935	0.121711	51.5336	9.47856
Schwarzenborn	OK	no trend	0.530053	0.077778	50.918	9.41774
Espa	OK	no trend	0.83101	0.022917	50.424	8.59354
Lautertal_Odenwald-Reichenbach	OK	no trend	0.196339	0.1775	49.709	8.6908

Schmillinghausen	OK	no trend	0.928398	-0.0182	51.4254	9.02368
Rabenau-Geilshausen	OK	no trend	0.088048	0.3	50.646	8.8879
Meissner	OK	increasing	0.046084	0.50381	51.2185	9.8228
Wiesbaden-Auringen	OK	no trend	0.714186	-0.06331	50.1319	8.3167
Bindsachsen	OK	no trend	0.989132	-0.00187	50.3502	9.16166
Gudensberg	OK	no trend	0.653079	-0.07263	51.1734	9.35942
Hemfurth	OK	no trend	0.333084	0.131439	51.1661	9.04899
Michelstadt-Vielbrunn	OK	no trend	0.842299	-0.02778	49.7175	9.0994
Guxhagen-Albshausen	OK	no trend	0.34687	0.251923	51.2044	9.5131
Hessisch_Lichtenau-Furstenhage	OK	no trend	0.587805	0.231579	51.2143	9.6924
Wanfried	OK	no trend	0.910373	-0.03158	51.1876	10.1638
Lohnberg-Obershausen	OK	no trend	0.785666	-0.075	50.5617	8.2386
Schluchtern	OK	no trend	0.821525	0.1125	50.3328	9.50289
Haiger	OK	no trend	0.238993	-0.31727	50.743	8.22612
Usingen	OK	increasing	0.045998	0.44625	50.3426	8.53172
Darmstadt	OK	no trend	0.430331	-0.16283	49.8809	8.6779
Selgenhof	OK	no trend	0.118579	0.428611	50.5737	9.20703

Tabelle B1: Ergebnisse der Trendanalyse auf Stationsebene mit Koordinaten (eigene Darstellung)

Anhang C: Bruchpunktanalyse aller Stationen

Die Ergebnisse der Bruchpunktanalyse für alle untersuchten Stationen sind in Tabelle C-1 zusammengefasst.
Für jede Station wird angegeben, ob ein signifikanter Bruchpunkt identifiziert wurde und in welchem Jahr dieser auftrat.

Station	Messjahre	Zeitraum von	Zeitraum bis	Bruchpunkte roh	Klassifikation
Alsfeld-Eifa	45	1979	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Amoneburg-Rudigheim	81	1941	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Arolsen-Landau	92	1931	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Asslar_Klein-Altenstadten	43	1982	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Bad_Camberg	92	1931	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Bad_Hersfeld	76	1949	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Bad_Homburg	92	1931	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Bad_Nauheim	73	1947	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Bad_Schwalbach-Langenseifen	80	1941	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Bad_Soden-Salmuster	91	1931	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität

Bad_Sooden-Allendorf	76	1941	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Bad_Vilbel-Dortelweil	88	1931	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Bad_Zwesten	73	1951	2023	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Battenberg-Berghofen	80	1941	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Battenberg-Hof_Karlsburg	73	1951	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Beberbeck	40	1982	2022	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Bebra	47	1977	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Beerfelden	86	1937	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Biblis	80	1941	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Biebesheim	36	1977	2018	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Biedenkopf-Wallau	124	1893	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Bindsachsen	36	1988	2023	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Braunfels	94	1931	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Burgwald-Bottendorf	70	1953	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Colbe	66	1949	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Darmstadt	29	1996	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Dieburg	75	1941	2017	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Diemelsee-Rhenegge	88	1931	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Diemelstadt-Rhoden	77	1941	2023	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Dillenburg	74	1947	2021	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Driedorf	93	1931	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Ebsdorfergrund-Ebsdorf	85	1931	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Eibelshausen	41	1975	2016	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Eschwege	75	1948	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Espa	41	1984	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Espenau-Monchehof	82	1941	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität

Florsbachtal-Florsbach	69	1951	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Frankenau	93	1931	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Frankfurt_Main-Flughafen	76	1949	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Frankfurt_Main-Stadt	150	1870	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Freiensteinau	43	1981	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Freigericht-Altenmittlau	77	1931	2016	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Frielendorf-Verna	94	1931	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Fulda	65	1954	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Gedern-Schonhausen	92	1931	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Geisenheim	95	1930	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Gernsheim	81	1941	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Giegenberg	45	1980	2024	1	ein Bruchpunkt (2015)
Giessen	78	1947	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Gilserberg-Moischeid	70	1951	2022	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Gladenbach	73	1951	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Glaserzell	42	1981	2023	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Grasellenbach-Hammelbach	77	1941	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Grebenau-Reimenrod	92	1931	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Grebenhain	83	1941	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Grebenstein	82	1941	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Greifenstein	125	1893	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Gross-Gerau-Wallerstadten	82	1941	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Grunberg_Hessen	79	1941	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Gudensberg	36	1988	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Guxhagen-Albshausen	32	1992	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Haiger	30	1995	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität

Haunetal-Wehrda	94	1931	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Hemfurth	37	1988	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Heringen_Werra	61	1951	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Herleshausen-Archfeld	90	1931	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Hessisch_Lichtenau-Furstenhage	27	1992	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Hochwaldhausen	44	1980	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Hofbieber-Elters	117	1898	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Hofheim_Taunus	92	1931	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Hohenahr_Leiterhof	61	1961	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Hohenstein-Breithardt	92	1931	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Idstein	92	1931	2023	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Kassel_Schauenburg	47	1978	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Kaufungen-Niederkaufungen	67	1951	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Kefenrod-Bindsachsen	71	1941	2017	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Kirchhain	48	1977	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Kirtorf	67	1951	2017	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Kleiner_Feldberg_Taunus	85	1936	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Knullwald-Niederbeisheim	85	1931	2022	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Korbach-Rhena	90	1931	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Krofdorf	48	1977	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Lampertheim-Neuschloss	74	1951	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Langgons-Niederkleen	53	1951	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Lautertal-Meiches	93	1931	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Lautertal_Odenwald-Reichenbach	41	1984	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Lich	85	1931	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Liebenau-Haueda	90	1931	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität

Lohnberg-Obershausen	31	1994	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Mademuhlen	46	1978	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Mainhausen-Zellhausen	90	1931	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Marburg	48	1977	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Meiches	37	1981	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Meissner	32	1987	2020	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Melsungen-Burstoss	71	1950	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Mengerskirchen	93	1931	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Messel	77	1941	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Michelstadt	74	1951	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Michelstadt-Vielbrunn	35	1990	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Muhlheim_Main	81	1941	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Munzenberg-Gambach	79	1941	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Naumburg-Altenstadt	79	1931	2016	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Neuenstein-Muhlbach	73	1951	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Neukirchen-Hauptschwenda	91	1931	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Neustadt	92	1931	2024	1	ein Bruchpunkt (1998)
Nidderau-Erbstadt	91	1931	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Niederaula	65	1951	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Orlen	43	1975	2018	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Ottrau-Immichenhain	71	1951	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Petersberg-Marbach	91	1931	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Pohlheim-Hausen	93	1931	2023	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Rabenau-Geilshausen	39	1985	2023	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Ranstadt-Ober-Mockstadt	82	1941	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Rasdorf	68	1951	2019	0	kein Bruchpunkt – Variabilität

Raunheim	46	1978	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Reichelsheim_Odenwald	69	1951	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Reinhardshagen-Vaake	92	1931	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Reinheim	70	1951	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Rengershausen	44	1978	2021	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Rodermark-Ober-Roden	92	1931	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Ronneburg-Huttengesass	80	1941	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Rotenburg-Braach	84	1931	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Rudesheim-Presberg	54	1971	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Schaafheim-Schlierbach	43	1982	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Schenklengsfeld-Wustfeld	83	1931	2017	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Schluchtern	22	1994	2017		zu kurze Zeitreihe
Schluchtern-Herolz	73	1947	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Schmillinghausen	41	1984	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Schotten	71	1949	2021	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Schwalmstadt-Ascherode	91	1931	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Schwarzenborn	43	1982	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Selgenhof	28	1996	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Selters_Taunus-Niederselters	38	1978	2021	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Sontra	53	1961	2023	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Staufenberg-Treis	93	1931	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Steinau-Ulmbach	78	1941	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Tann_Rhon	75	1947	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Trendelburg	73	1951	2024	1	ein Bruchpunkt (2022)
Twistetal-Muhlhausen	93	1931	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Usingen	28	1995	2023	0	kein Bruchpunkt – Variabilität

Vohl-Buchenberg	47	1978	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Volkmarsen	91	1931	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Wabern-Hebel	87	1931	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Wachtersbach	91	1931	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Wahlsburg-Lippoldsberg	61	1955	2022	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Waldbrunn-Lahr	71	1951	2023	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Waldeck-Alraft	92	1931	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Waldems-Reinborn	74	1946	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Waldkappel-Schemmern	66	1951	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Wanfried	29	1993	2022	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Wasserkuppe_Rhon	78	1947	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Weilmunster	81	1931	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Weilrod-Niederlauken	83	1931	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Weiterstadt-Schneppenhausen	61	1961	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Wetter_Hessen-Amonau	85	1935	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Wiesbaden-Auringen	37	1988	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Wiesbaden-Biebrich	130	1893	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Witzenhausen-Ziegenhagen	69	1951	2019	0	kein Bruchpunkt – Variabilität
Wohratal	62	1951	2021	1	ein Bruchpunkt (2001)
Wolfhagen-Wenigenhasungen	51	1971	2024	0	kein Bruchpunkt – Variabilität

Tabelle C1: Ergebnisse der Bruchpunktanalyse aller Stationen (eigene Darstellung)

Anhang D: Verteilung der Intensitätsklassen

Zur ergänzenden Analyse der Jahreshöchstwerte ≥ 50 mm wurde die Verteilung der Ereignisse nach Intensitätsklassen ausgewertet.
Die Abbildung D-1 zeigt die Gesamtverteilung der Ereignisse ≥ 50 mm über alle betrachteten Klassen.

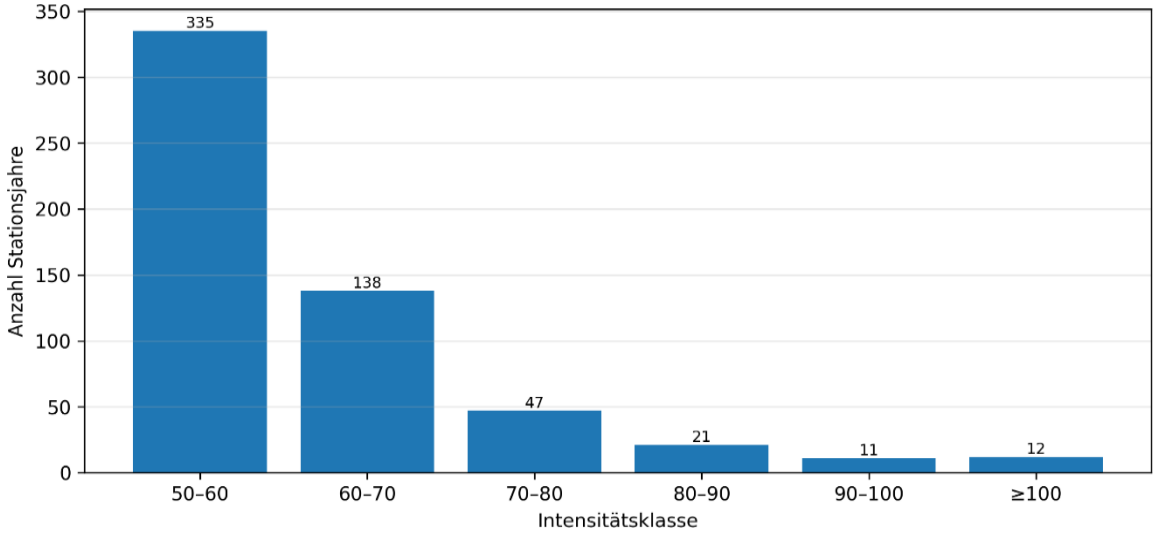


Abbildung D 1: Verteilung der Jahreshöchstwerte ≥ 50 mm nach Intensitätsklassen (eigene Darstellung)

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass die vorliegende Arbeit von mir selbständig verfasst wurde, ich keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel – insbesondere keine im Literaturverzeichnis nicht benanntenInternet-Quellen – benutzt habe und die Arbeit von mir vorher nicht in einem anderen Prüfungsverfahren eingereicht wurde. Die Stellen meiner Arbeit, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen sind, habe ich unter Angabe der Quelle als Zitat kenntlich gemacht. Die eingereichte schriftliche Fassung entspricht der elektronisch übermittelten Version.

Göttingen, den 31. März 2026

_____

(Unterschrift