



Ausweisung von starkregengefährdeten Gebieten in Hessen für Planungen zur Gefahrenabwehr auf Landes- und kommunaler Ebene

Abschlussbericht

an das Hessische Landesamt für Naturschutz,
Umwelt und Geologie (HLNUG)
- Fachzentrum Klimawandel und Anpassung Hessen -



PROJEKTZEITRAUM 15.10.2016 – 31.12.2019

Leitung: Prof. Dr. Gerald Kuhnt¹

Bearbeitung: M. Sc. Jennifer Kreklow¹, Dr. Björn Tetzlaff² und M. Sc. Phuong Ta²

¹ Leibniz Universität Hannover (LUH), Institut für Physische Geographie und Landschaftsökologie

² Forschungszentrum Jülich (FZJ), Agrosphäre im Institut für Bio- und Geowissenschaften (IBG-3)

November 2019

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	iii
Tabellenverzeichnis.....	iv
Kartenverzeichnis.....	iv
1 Einleitung.....	1
2 Projektbaustein 1 – Beschaffung, Aufbereitung und Prozessierung der Datengrundlagen.....	2
2.1 Radarklimatologie (RADKLIM).....	2
2.1.1 Versionen und Bereitstellung der Radarklimatologie.....	2
2.1.2 Recherche bereits vorhandener Verarbeitungswerkzeuge.....	3
2.1.3 Entwicklung einer automatisierten Verarbeitungsmethodik.....	4
2.1.4 Veröffentlichung der entwickelten Routinen – die Python-Bibliothek radproc.....	10
2.2 Ombrometerdaten.....	10
2.2.1 Stationsdaten des DWD.....	10
2.2.2 Stationsdaten des HLNUG.....	11
2.3 Erstellung einer Starkregendatenbank.....	13
2.3.1 Hintergrund.....	13
2.3.2 Recherche und Klassifikation von Starkregenereignissen.....	14
2.3.3 Ergebnisse und Diskussion.....	16
2.4 Sonstige Geodaten.....	25
2.4.1 Windenergieanlagen.....	25
2.4.2 Flugrouten des Frankfurter Flughafens.....	25
3 Projektbaustein 2 – Entwicklung und Anwendung eines Konzepts zur Plausibilisierung der Radarklimatologie.....	26
3.1 Niederschlagssummen.....	26
3.1.1 Niederschlagsquantifizierung und räumliche Verteilung.....	27
3.1.2 Einfluss der zusätzlichen Aneichstationen.....	30
3.2 Höhenabhängigkeit und Saisonalität.....	31
3.2.1 Hintergrund.....	31
3.2.2 Güte der verwendeten Höheninformationen.....	32
3.2.3 Vergleich der Höhenabhängigkeit zwischen Ombrometern, RW002 und RW003.....	33
3.2.4 Saisonalität der Höhenabhängigkeit.....	35
3.3 Niederschlagsintensität.....	36
3.4 Abschließende Bewertung.....	39

4 Projektbaustein 3 – Erstellung von Starkregen-Hinweiskarten Teil 1: Analyse der Starkregencharakteristik auf Basis der Radarklimatologie	40
4.1 Konzept und Format der Karte(n)	40
4.2 Analyse der Starkregencharakteristik	42
4.2.1 Definition der Starkregenklassen	42
4.2.2 Methodik	44
4.2.3 Ergebnisse	50
5 Projektbaustein 4 - Erstellung von Starkregen-Hinweiskarten Teil 2.....	53
5.1 Der Starkregenhinweis-Index.....	53
5.1.1 Eingangsdaten für den Starkregenhinweis-Index	54
5.1.2 Ermittlung des Starkregenhinweis-Index.....	64
5.1.3 Ergebnisse zum Starkregenhinweis-Index für Hessen	66
5.2 Vulnerabilitäts-Index.....	67
5.2.1 Eingangsdaten.....	68
5.2.2 Ableitung des Vulnerabilitäts-Index	71
5.2.3 Ergebnisse.....	74
5.3 Plausibilisierung des Starkregenhinweis-Index.....	75
6 Projektbaustein 5 – Entwicklung und Anwendung einer Methodik zur Ableitung des R-Faktors auf Basis der Radarklimatologie	83
6.1 Hintergrund und Stand der Forschung.....	83
6.2 Methodik	84
6.2.1 Berechnung des R-Faktors nach DIN19708.....	84
6.2.2 Berechnung des R-Faktors mittels Regressionsgleichungen.....	86
6.2.3 Anwendung der Skalierungsfaktoren zum Ausgleich von Messmethodik und zeitlicher Auflösung der Eingangsdaten	87
6.3 Ergebnisse	87
6.3.1 Räumliche Verteilung der berechneten R-Faktoren	87
6.3.2 Statistischer Vergleich der unterschiedlichen R-Faktor Ableitungen	91
6.4 Schlussfolgerungen	94
7 Zusammenfassung.....	96
Quellenverzeichnis	99

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Arbeitsablauf zur Prozessierung von RADOLAN-Binärdaten mit Python und ArcGIS (KREKLOW 2019)	5
Abb. 2: Methodik zum Zuschneiden der RADOLAN-Daten auf Hessen.....	7
Abb. 3: Anzahl der Starkregenmeldungen pro Jahr unterteilt nach Art der Datenquelle.....	18
Abb. 4: Anzahl der Starkregenmeldungen pro Monat, Zeitraum 2001 - 2016	19
Abb. 5: Gebietsmittel der Jahresniederschläge in Hessen für Ombrometerstationen und Reanalyse 2017.002.....	29
Abb. 6: Vergleich der Übereinstimmung von punktuellen Höheninformationen aus den Metadaten der Niederschlagsstationen und aggregiertem DGM1000.....	32
Abb. 7: Vergleich der Regressionsmodelle für Ombrometermessungen und Höhe ü. NN auf Basis unterschiedlicher Höhendaten.	33
Abb. 8: Vergleich der Höhenabhängigkeit der Niederschlagssummen der RADKLIM-Daten in den 128 Pixeln unmittelbar an den Ombrometerstationen.....	34
Abb. 9: Vergleich der Höhenabhängigkeit der Niederschlagssummen der RADKLIM-Daten für das Bundesland Hessen.	34
Abb. 10: Regressionsanalyse der Höhenabhängigkeit der Niederschlagssummen im Sommer- und Winterhalbjahr.	35
Abb. 11: Vergleich der Klassenhäufigkeit im Zeitraum 2001 - 2014 zwischen RW Reanalyse 2017.003 und Ombrometern	37
Abb. 12: Planungsebenen bei der Starkregen-Gefahrenabwehr	40
Abb. 13: Berechnung von Niederschlagshöhen der Dauerstufe D = 15 Minuten	45
Abb. 14: Schematische Darstellung des Algorithmus zur Selektion der zu zählenden Starkregenereignisse	47
Abb. 15: Fallbeispiel für die Funktionsweise des Selektionsalgorithmus.....	48
Abb. 16: Auszug aus dem "Starkregen-Informationssystem"	52
Abb. 17: Ableitung eines Starkregenhinweis-Index für 1*1 km ² Gitterzellen.....	54
Abb. 18: Änderungen des Flächenanteils von Starkregenhäufigkeiten vor und nach Umprojektion	56
Abb. 19: Ableitung eines Vulnerabilitäts-Index für 1*1 km ² Gitterzellen	68
Abb. 20: Verteilung der Klassen des Starkregengefährdungs-Index im Umfeld der Schadensorte nach Tab. 12	82
Abb. 21: Boxplots der unterschiedlichen Ableitungen des R-Faktors an den Standorten der Ombrometer	92
Abb. 22: Boxplots der unterschiedlichen Ableitungen des R-Faktors.....	92
Abb. 24: Korrelation zwischen mittlerem Sommerniederschlag und R-Faktor der Radarklimatologie	93
Abb. 23: Korrelation zwischen mittlerem Sommerniederschlag und R-Faktor des Ombrometerdatensatzes	93

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Das Datenformat der HLNUG-Ombrometer.....	12
Tab. 2: Übersicht der verwendeten Quellen.....	15
Tab. 3: Klassifikation der recherchierten Starkniederschlagsereignisse.....	16
Tab. 4: Schwierigkeiten der Starkregenrecherche und deren Auswirkungen.....	17
Tab. 5: Statistische Kennwerte der mittleren Niederschlagssummen von RADKLIM- und Ombrometer-Daten für den Zeitraum 2001 - 2014.....	28
Tab. 6: Übersicht der Starkregenklassifikation als Grundlage der Starkregen-Hinweiskarten.....	43
Tab. 7: Anzahl der ermittelten Starkregen an unterschiedlichen Zeitpunkten und Tagen pro Klasse .	50
Tab. 8: Benötigte Eingangsdaten für die Ableitung des Starkregenhinweis-Index (SHI)	54
Tab. 9: Klassifizierung der Überflutungsgefahr von Senken und Fließwegen (DWA M 119, 2016).....	59
Tab. 10: Klassifizierung der Überflutungsgefahr nach Wasserständen (DWA M 119, 2016).....	59
Tab. 11: Benötigte Eingangsdaten für die Ableitung des Vulnerabilitäts-Index (VI).....	68

Kartenverzeichnis

Karte 1: Anzahl der Starkregenmeldungen pro Gemeinde in Hessen.....	20
Karte 2: Unwettereinsätze pro Gemeinde 2012-2014 laut FLORIX-Datenbank (<i>WINTERRATH 2016</i>).....	20
Karte 3: Dichte der recherchierten Starkregenereignisse pro Gemeinde in Hessen	22
Karte 4: Anzahl der Feuerwehreinätze pro Landkreis in Hessen laut FLORIX-Datenbank.....	23
Karte 5: Anzahl der recherchierten Starkregenmeldungen pro Landkreis in Hessen	24
Karte 6: Anzahl der recherchierten Starkregenereignisse pro Landkreis in Hessen	24
Karte 7: Mittlere Jahresniederschlagssumme Hessens im Zeitraum 2001 - 2014 auf Basis von RADKLIM-Reanalyselauf RW 2017.003 und Ombrometerstationen.....	27
Karte 8: Mittlere Differenz der Jahresniederschlagssumme 2001 - 2014 zwischen den Reanalysen 2017.003 und 2017.002	30
Karte 9: Anzahl der Niederschlagsintervalle in der Klasse 0,01 - 0,99 mm/h in RW003 im Zeitraum 2001 - 2014	38
Karte 10: Anzahl der Starkniederschlagsereignisse pro Klasse für die Dauerstufen D = 15 und D = 60 Minuten	51
Karte 11: Auswertung der Häufigkeit von Starkniederschlagsereignissen	55
Karte 12: Landnutzung nach ALKIS.....	57
Karte 13: Ortslagen nach ATKIS.....	58
Karte 14: Abgeleitete urbane Gebietskulisse.....	58
Karte 15: Ausweisung überflutungsgefährdeter Flächen auf Basis der GIS-gestützten Reliefanalyse.....	62
Karte 16: Ausweisung überflutungsgefährdeter Flächen auf Basis des Modells FloodScreener für D 60-3.....	62
Karte 17: Ausweisung überflutungsgefährdeter Flächen auf Basis des Modells HEC-RAS	

für D 15-1.....	63
Karte 18: Ausweisung überflutungsgefährdeter Flächen auf Basis des Modells HEC-RAS für D 60-3.....	63
Karte 19: Bewertung der Komponente „Starkregenhäufigkeit“ als Teil des Starkregenhinweis-Index.....	64
Karte 20: Bewertung der Komponente „Gebietskulisse“ als Teil des Starkregenhinweis-Index	65
Karte 21: Bewertung der Komponente „Überflutungsgefährdung“ als Teil des Starkregenhinweis-Index.....	65
Karte 22: Starkregenhinweis-Index für Hessen	67
Karte 23: Bevölkerungsdichte 2017	69
Karte 24: Ausgewählte Industrie- und Gewerbeanlagen	69
Karte 25: Standorte von Krankenhäusern in Hessen 2018	70
Karte 26: Ergebnisse des Erosionsatlases Hessen 2018.....	70
Karte 27: Bewertung der Bevölkerungsdichte	72
Karte 28: Bewertung der Industrieanlagen nach BImSchV	72
Karte 29: Bewertung der Zahl der Krankenhäuser.....	73
Karte 30: Bewertung der Erosionsgefahr	73
Karte 31: Vulnerabilitäts-Index.....	74
Karte 32: Starkregenhinweis-Index und überlagerter Vulnerabilitäts-Index	75
Karte 33: Standorte der recherchierten Starkregenereignisse und Schadensmeldungen	76
Karte 34: R-Faktor berechnet nach DIN19708 aus dem 5-minütig aufgelösten RADKLIM YW-Produkt	88
Karte 35: R-Faktor aus dem Erosionsatlas Hessen	89
Karte 36: Prozentuale Veränderung des neu abgeleiteten R-Faktors gegenüber dem Erosionsatlas ..	89
Karte 37: R-Faktor berechnet nach DIN19708 skaliert nach Fischer et al (2018)	90
Karte 38: Prozentuale Veränderung des neu abgeleiteten skalierten R-Faktors gegenüber dem Erosionsatlas	91

1 Einleitung

Heftige Starkniederschläge oftmals kurzer Dauer treten insbesondere im Sommerhalbjahr auf und können lokal zu Sturzfluten und Überschwemmungen mit hohem Schadenspotenzial führen. Jüngere Studien und Klimaprojektionen lassen zudem erwarten, dass es in Zukunft zu einer Zunahme und Intensivierung derartiger Starkregenereignisse kommen könnte. Das Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) hat das Projekt „Klimawandel in der Praxis – Starkregen und Katastrophenschutz in Kommunen“ (KLIMPRAX-Starkregen) initiiert, um besonders von Starkregen betroffene Gebiete zu identifizieren und die Kommunen bei der Prävention gegen Schäden durch Starkregen und Sturzfluten zu unterstützen. Vorrangiges Ziel des Projektes ist es, die Grundlagen für ein Starkregen-Management für das Bundesland Hessen zu schaffen.

Hierzu arbeiten als Projektpartner das HLNUG, das Hessische Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft, und Verbraucherschutz (HMUKLV), das Hessische Ministerium für Inneres und Sport (HMdIS), der Deutsche Wetterdienst (DWD), der Hessische Städtetag (HST) und der Hessische Städte- und Gemeindebund (HSGB) sowie als Auftragnehmer die Hochschule RheinMain, die Firma Infrastruktur und Umwelt Darmstadt, die Leibniz Universität Hannover (LUH) und das Forschungszentrum Jülich (FZJ) mit.

Das Teilprojekt 1.4 in KLIMPRAX-Starkregen befasst sich mit der Auswertung der Radarklimatologie (RADKLIM) des DWD für Hessen und der darauf aufbauenden Erstellung von Starkregen-Hinweiskarten, welche eine erste grobe Einschätzung der Starkregengefährdung einer Kommune oder Region ermöglichen sollen. Das Forschungsprojekt „Ausweisung von starkregengefährdeten Gebieten in Hessen für Planungen zur Gefahrenabwehr auf Landes- und kommunaler Ebene“, wird in einer Kooperation zwischen dem Institut für Physische Geographie und Landschaftsökologie der Leibniz Universität Hannover und dem Institutsbereich Agrosphäre im Institut für Bio- und Geowissenschaften (IBG-3) des Forschungszentrums Jülich durchgeführt. Die durchgeführten Arbeiten dienen der Erfüllung des KLIMPRAX-Starkregen Arbeitspaketes 1.4.

Die Ziele des Forschungsprojekts sind:

- Umfangreiche Plausibilitätsprüfung der neuen RADKLIM-Daten als Ergebnis einer Reanalyse der operationellen RADOLAN („Radar-Online-Aneichung“)-Daten durch den DWD und Bewertung ihrer Eignung für die im Projekt geplanten Anwendungen.
- Auswertung der Radarklimatologie zur Identifizierung von Gebieten mit besonders hoher Starkregenhäufigkeit.
- Weitergehende Auswertungen zur Identifizierung von Gebieten, für die auf Grund unterschiedlicher Gefährdungs- und Vulnerabilitätsfaktoren eine detaillierte Gefährdungsanalyse vorrangig erforderlich ist.
- Entwicklung und Anwendung einer Methodik zur Ableitung des R-Faktors der Allgemeinen Bodenabtragsgleichung auf Basis der Radarklimatologie.

Die entstehenden digitalen Kartenprodukte und Werkzeuge sollen die hessischen Städte und Gemeinden sowie die Landesplanung (HLNUG u.a.) bei der Planung von Maßnahmen zur Verringerung von Schäden durch Starkregen unterstützen.

2 Projektbaustein 1 – Beschaffung, Aufbereitung und Prozessierung der Datengrundlagen

2.1 Radarklimatologie (RADKLIM)

2.1.1 Versionen und Bereitstellung der Radarklimatologie

Zentraler Bestandteil des vorliegenden Projektes ist die Plausibilitätsprüfung und Auswertung der Radarklimatologie (RADKLIM) des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Dabei handelt es sich um eine Reanalyse der Radardaten des DWD auf Grundlage der aktuellen, operationellen RADOLAN-Routinen (RADar OnLine ANeichung). Die Anwendung einheitlicher Routinen auf dem aktuellen Stand der Forschung auf den gesamten Radardatenbestand bis zurück ins Jahr 2001 hatte die Generierung eines um rund viereinhalb Jahre verlängerten und homogeneren Datensatzes zum Ziel. Weitere Verbesserungen wurden mit zusätzlichen Aneichstationen und neu entwickelten Verfahren, u. a. zur Korrektur von Speichen sowie der entfernungs- und höhenabhängigen Signalreduktion, angestrebt. Zudem wurde der Radius der verwendeten lokalen Radardaten von 150 km auf 128 km reduziert. Eine detaillierte Beschreibung der verwendeten Korrekturverfahren und Datenbasis ist Winterrath et al. (2017) zu entnehmen.

Analog zu RADOLAN wird das stündlich aufgelöste Endprodukt der Radarklimatologie nach Aneichung an Bodenstationen und Erstellung eines nationalen Komposits als RW-Produkt bezeichnet. Während die 5-minütig aufgelösten RADOLAN-Produkte RZ und RY nur sehr eingeschränkt korrigiert und nicht angeeicht werden, handelt es sich beim 5-minütig aufgelösten RADKLIM YW-Produkt um einen korrigierten und per Disaggregation von RW-Stundensummen quasi-angeeichten Datensatz. Im Gegensatz zu den ursprünglichen RADOLAN RW-Daten, welche über das Climate Data Center heruntergeladen wurden, liegen die beiden reanalysierten RADKLIM-Produkte im erweiterten nationalen Komposit vor. Dieses erstreckt sich jeweils 100 km weiter nach Norden und Süden als das nationale Komposit und ist um 80 km nach Osten verschoben, sodass es sich um ein 1100 x 900 Raster mit 1 km Auflösung handelt (Winterrath et al. 2017). Ansonsten sind die Formate der originalen und der reanalysierten Produkte mit Ausnahme einer geringfügigen Änderung im Datenheader identisch.

Die Reanalyse der Radardaten erfolgte seitens des DWD im Rahmen des bis Mai 2017 angesetzten Projektes „Erstellung einer radarbasierten Niederschlagsklimatologie“. Die rund achtmonatige Überschneidung beider Projekte sowie mehrfache Verzögerungen innerhalb des DWD-Projektes führten schließlich zu einer gut sechsmonatigen Verzögerung der Datenbereitstellung und entsprechend der Auswertungen des vorliegenden Projektes.

Am 27.03.2017 erfolgte die Bereitstellung des RW-Produktes für den Zeitraum 2001 - 2014 aus der Zwischenanalyse durch den DWD. Das YW-Produkt wurde am 06.04.2017 für den Zeitraum 01/2001 – 03/2008 bereitgestellt, die Lieferung der Daten des Zeitraums bis 2014 erfolgte am 12.05.2017. Bei diesen bereitgestellten Daten handelte es sich jedoch noch nicht um das Endprodukt der Reanalyse, da diese Daten noch keine Korrekturen für Speichen und Entfernungsdämpfung enthielten.

Folglich wurden zunächst noch keine Auswertungen dieser Daten vorgenommen, sondern der Schwerpunkt des ersten Projektjahres auf die Entwicklung einer weitgehend automatisierten Methodik zur Prozessierung der RADKLIM-Daten gelegt, um die Auswertungen nach Bereitstellung des Endproduktes der Reanalyse möglichst zügig durchführen zu können.

Die Bereitstellung der vollständigen, fertigen Radarklimatologie (RW und YW-Produkt des Reanalyselaufs 2017.002) erfolgte schließlich im September 2017.

Im Rahmen des KLIMPRAX-Arbeitspaketes 1.2 wurde jedoch noch ein weiterer Reanalyselauf (2017.003) durchgeführt, welcher zusätzlich die Ombrometerstationen des HLNUG sowie einiger Stationen im Harz zur Anreichung verwendet (Winterrath & Junghänel mdl. 2018). Allerdings lagen dem DWD die Messungen der zusätzlichen Ombrometerstationen nur bis einschließlich 2014 vor, weshalb die aus diesem Arbeitspaket resultierende Zeitreihe um zwei Jahre kürzer ist als die aus Reanalyse 2017.002.

Die Bereitstellung dieses abschließenden Reanalyselaufs aus AP 1.2, welcher für die Projektbearbeitung vorgesehen war, erfolgte am 06.11.2017.

2.1.2 Recherche bereits vorhandener Verarbeitungswerkzeuge

Während der Entwicklung einer Methodik zur Datenverarbeitung wurde zunächst recherchiert, ob es bereits Werkzeuge zur Verarbeitung von RADOLAN-Daten gibt, die für das vorliegende Projekt zugänglich und hilfreich sind und auch für die Prozessierung der neuen Radarklimatologie direkt nutzbar oder modifizierbar sind.

Im Rahmen des KLIMPRAX Arbeitspaketes 2.1, für das sich die Hochschule Rhein-Main verantwortlich zeigt, soll eine Software zur Aufbereitung von Starkregenereignissen als ArcGIS-kompatible Eingangsdatensätze für Niederschlag-Abfluss-Modelle erstellt werden. Einige der dort entwickelten Routinen waren unter dem Namen RADAR bereits auf der Homepage der HOCHSCHULE RHEIN-MAIN (2016) frei zugänglich. Darunter waren Routinen zur Umwandlung einzelner RADOLAN RW-Dateien in ArcGIS-kompatible ASCII-Dateien, zur Bildung von Summen oder Mittelwerten für einen angegebenen Zeitraum und zur Ermittlung von Überschreitungshäufigkeiten für ausgewählte Schwellenwerte. Die Verwendung dieser Routinen wurde getestet, deren Einbindung muss jedoch vor dem Hintergrund der angestrebten und notwendigen Automatisierung der Datenverarbeitung kritisch hinterfragt werden. Bei diesen Routinen handelt es sich um bereits kompilierte exe-Dateien, welche keine Ansicht und Modifikation des Quellcodes erlauben und zudem manuell in der Kommandozeile ausgeführt werden müssen. Folglich ist keine Integration, sondern bestenfalls eine Anbindung eigener Entwicklungen möglich, was für das Ziel der Automatisierung nicht förderlich und zu unflexibel ist. Da dieses Arbeitspaket zum damaligen Zeitpunkt noch nicht abgeschlossen war, waren zudem noch nicht alle vorgesehenen Routinen fertig und es lagen bis dato noch keine Routinen für die Verarbeitung des YW-Produktes vor.

Darüber hinaus hat die Erfahrung aus der Vorstudie (PEUßNER 2013) gezeigt, dass eine möglichst nahtlose Integration von ArcGIS in die Verarbeitungsmethodik unerlässlich für die im Projekt geplanten

Auswertungen sowie die kartographische Darstellung ist. In der Vorstudie wurde die Verarbeitung der Rohdateien mit Python durchgeführt, die Auswertung der Daten erfolgte jedoch in der Programmiersprache R, welche für statistische Anwendungen sehr verbreitet ist. Eine Schnittstelle für den Datenaustausch zwischen R und ArcGIS existiert zwar, allerdings ermöglicht R keine direkte GIS-Programmierung. Zudem zeigte sich, dass R zum Arbeiten mit Zeitreihen nicht optimal ist.

Eine unmittelbare Einbindung von ArcGIS, welche die automatisierte Ausführung von Geoverarbeitungswerkzeugen und Erstellung von Kartenserien erlaubt, ist nur mit der Programmiersprache Python angemessen zu realisieren, da alle GIS-Werkzeuge in Python programmiert sind.

In Python sind zudem zahlreiche Zusatzbibliotheken für wissenschaftliches Arbeiten verfügbar, darunter NumPy (Numerical Python) und pandas.

NumPy ist die Grundlage für wissenschaftliches Programmieren in Python. Es ermöglicht eine effiziente Datenverarbeitung durch multidimensionale Arrays, also Sequenzen von Werten gleichen Datentyps. Darauf aufbauend stellt die Bibliothek pandas vielseitige Datenstrukturen und Funktionen für die Arbeit mit strukturierten Daten bereit. Die wichtigsten sind der DataFrame, eine zweidimensionale, tabellarische Datenstruktur mit Titeln für Zeilen und Spalten sowie die Series, eine Art Array mit Beschriftung aller Elemente. Der DataFrame aus pandas ist stark an den DataFrame aus R angelehnt, allerdings für die Arbeit mit Zeitreihen optimiert, wodurch er sich ideal als Datenstruktur für Niederschlagsdaten eignet (McKINNEY 2015).

Eine Recherche von Python-Bibliotheken für die Verarbeitung von Wetterradardaten ergab, dass die Bibliothek wradlib (Weather Radar Library) Funktionen zum Einlesen der binären, komprimierten gz-Dateien als numpy-Arrays ermöglicht (WRADLIB.ORG o. J.). Wradlib ist als Open Source Bibliothek unter der sehr freizügigen MIT-Lizenz veröffentlicht worden, sodass das Einsehen, Kopieren und Verändern des Quellcodes möglich und erlaubt ist. Über diese Einlesefunktionen hinaus enthält wradlib einige Funktionen zur Prozessierung, Reanalyse und Konvertierung von verschiedenen Radardaten-Formaten, wovon die meisten für das vorliegende Projekt jedoch nicht relevant sind, da sie sich primär mit Rohdaten beschäftigen und wradlib zudem aufgrund einer eigenen Installation von GDAL (Geospatial Data Abstraction Library) nur sehr eingeschränkt mit ArcGIS kompatibel ist.

Eine aktuelle Übersicht weiterer Softwareprodukte zur Verarbeitung von RADOLAN- und RADKLIM-Produkten kann KREKLOW (2019) entnommen werden.

2.1.3 Entwicklung einer automatisierten Verarbeitungsmethodik

Als Ergebnis der in Kap. 2.1.2 vorgestellten Recherche wurde entschieden, eine eigene Methodik zur Prozessierung, GIS-Anbindung und Auswertung der RADOLAN-Daten basierend auf den Importfunktionen von wradlib und den wissenschaftlichen Bibliotheken NumPy und pandas zu entwickeln. Zur Entwicklung dieser Routinen dienten zunächst die Daten des RADOLAN RW-Produkts und anschließend die vom DWD bereitgestellten Daten der Zwischenanalyse als Formatvorlage.

Der Arbeitsablauf zur Prozessierung der RADKLIM-Binärdaten des RW- und YW-Produkts mit Python und ArcGIS ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt und wird im Folgenden vorgestellt.

Diese Methodik basiert darauf, die Elemente des Array-Index in ArcGIS räumlich zu verorten, die im Untersuchungsgebiet liegenden Elemente zu ermitteln und diese als Auswahlkriterium für die Messwerte im Array zu verwenden. Dazu wird zunächst ein neuer, eindimensionaler NumPy-Array der Länge 1100 x 900 mit den Zahlen von 0 bis 989999 erzeugt, welcher den Indexzahlen des Datenarrays entspricht. Der neue Array - fortan als ID-Array bezeichnet - wird zunächst in einen zweidimensionalen Array mit 1100 Zeilen und 900 Spalten umgewandelt und dieser anschließend als Raster in ArcGIS exportiert. Zur Verortung des Rasters in der für die RADOLAN- und RADKLIM-Daten verwendeten polarstereographischen Projektion wird die Koordinate des linken unteren Eckpunktes benötigt, allerdings lagen die RADOLAN-Unterstützungsdokumente des DWD im Climate Data Center zum damaligen Zeitpunkt nur für das nationale Komposit (900 x 900 Pixel) der RADOLAN Daten vor (DWD 2016a). Folglich musste die Koordinate in polarstereographischer Projektion zunächst mit Hilfe der Formeln aus DWD (2017) aus der Koordinatenangabe in Dezimalgrad berechnet werden, um die geographische Lage des Komposits für die Darstellung in ArcGIS zu ermitteln.

Das erstellte ID-Raster ermöglicht nun die exakte Lokalisierung jedes Radarpixels bzw. Array-Elements im erweiterten nationalen Komposit. Anschließend wird das ID-Raster Deutschlands in ArcGIS auf den als Shapefile vorliegenden Umriss des Bundeslandes Hessen zugeschnitten. Das Ergebnis ist ein rechteckiges Raster mit verringerter Ausdehnung, in dem z. B. Eckzellen, die nicht mehr innerhalb Hessens liegen, aber noch Teil des Rechtecks sind, mit dem NoData-Wert -9999 belegt sind. Dieses zugeschnittene ID-Raster wird wieder in einen eindimensionalen NumPy-Array konvertiert und alle NoData-Werte entfernt, sodass ein ID-Array entsteht, der nur noch die IDs aller Rasterzellen Hessens enthält.

Dieser ID-Array kann nun direkt genutzt werden, um aus dem Datenarray die in Hessen liegenden Messwerte auszuwählen und so den Datenarray auf Hessen zuzuschneiden. Der folgende Pseudocode veranschaulicht dies:

```
Datenarray_Hessen = Datenarray_Deutschland[ID_Array_Hessen]
```

Dieses Vorgehen ist sehr effizient in Bezug auf Rechenzeit und Speichernutzung, da nur zu Beginn ein Datenexport in ArcGIS notwendig ist und anschließend alle RADKLIM-Dateien nach dem Import in NumPy-Arrays direkt zugeschnitten werden können.

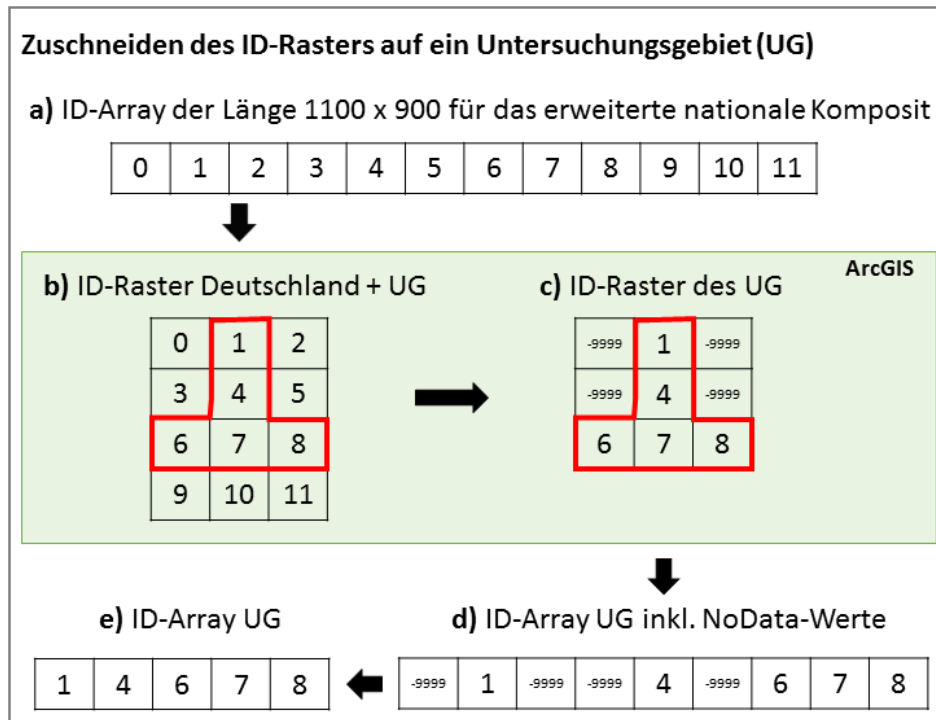


Abb. 2: Methodik zum Zuschneiden der RADOLAN-Daten auf Hessen

Datenformat und Speicherung

Die RADKLIM-Binärdateien wurden vom DWD als monatliche tar- bzw. tar.gz-Archive bereitgestellt. Diese wurden zunächst automatisiert in eine Ordnerstruktur entpackt, welche aus einem Verzeichnis pro Jahr und darin jeweils zwölf Monatsordnern besteht (Abb. 1 links unten).

Im Falle der YW-Daten sind die Tagesarchive innerhalb jedes Monatsarchivs komprimiert, die einzelnen Binärdateien jedoch nicht. Da der hochgerechnete Speicherbedarf für die unkomprimierten YW-Binärdateien für den Zeitraum 2001 – 2015 bei etwa 2,9 Terabyte liegt, wurde beim Entpacken eine Komprimierung aller Einzeldateien zu gz-Archiven vorgenommen. Diese können problemlos mit wradlib eingelesen werden und der Speicherbedarf verringert sich auf rund 60 Gigabyte.

Die entwickelte Methodik zur Prozessierung der RADOLAN-Daten basiert jeweils auf der gemeinsamen Verarbeitung und Speicherung aller Binärdateien eines Monats.

Zunächst wird eine Liste aller Binärdateien eines Monatsordners erstellt und die Anzahl der Dateien ermittelt. Anschließend wird ein leerer pandas DataFrame erstellt, dessen Anzahl Zeilen gleich der Anzahl Dateien im Monatsordner ist und dessen Anzahl Spalten der Länge des erzeugten ID-Arrays für Hessen entspricht.

Anschließend werden nacheinander alle Binärdateien mit wradlib importiert, auf Hessen zugeschnitten und der zugeschnittene, eindimensionale Datenarray als Zeile in den DataFrame eingefügt. Zusätzlich werden aus dem Header der RADOLAN-Datei Datum und Uhrzeit der Messung ausgelesen und in Form eines sogenannten datetime-Objekts in einer Liste gespeichert. Abschließend wird diese Liste als Zeilenindex und die IDs des ID-Arrays als Spaltenbeschriftungen eingefügt sowie die automatisch als solche erkannte Zeitreihe im Zeilenindex um die Informationen zu Zeitzone (UTC) und Frequenz (je nach RADKLIM-Produkt stündlich oder 5-minütig) ergänzt.

Ein Ausschnitt eines solchen DataFrames ist in Abb. 1 dargestellt. Dieses Datenformat ermöglicht gleichermaßen den Zugriff auf das Niederschlagsraster eines beliebigen Intervalls (bei Auswahl einer Zeile) wie den Zugriff auf die Niederschlagszeitreihe an jeder beliebigen Rasterzelle (bei Auswahl einer Spalte), welche durch das ID-Raster in ArcGIS zudem exakt lokalisiert werden kann. In Kombination mit den zahlreichen Methoden zur Datenanalyse, die in pandas speziell für DataFrames zur Verfügung stehen, ist dies ein äußerst flexibles Datenformat, welches sehr gut für die räumliche und zeitliche Analyse der RADKLIM-Daten geeignet ist.

Die Speicherung der monatlichen Dataframes erfolgt als Datasets in einer HDF5-Datei (HDF = Hierarchical Data Format). HDF5 ermöglicht die Speicherung beliebig vieler und großer Datensätze mit beliebiger Verzeichnisstruktur in einer einzigen Datei, welche zudem komprimierbar ist. HDF5 wird auch in anderen Institutionen zur Speicherung von Radardaten genutzt (ABDELLA & ALFREDSSEN 2010, HEISTERMANN et al. 2013, MICHELSON et al. 2014). Pandas verfügt über eine sehr effiziente Schnittstelle, um DataFrames als HDF5-Datasets abzulegen und wieder einzulesen. Die DataFrames werden in der HDF5-Datei mit der gleichen Verzeichnisstruktur abgelegt wie die Originaldaten, also jeweils ein Verzeichnis (in HDF5 als Gruppe bezeichnet) pro Jahr und darin jeweils zwölf DataFrames (in HDF5: Datasets) mit allen Daten eines Monats.

Einziges Nachteil von HDF5 ist, dass es sich um ein primär zeilenbasiertes Datenformat handelt und der Speicherplatz für Metadaten der Spalten, also bspw. Datentyp und Name, im ‚table‘-Format auf 64 KB begrenzt ist (HDF GROUP 2016). Dieses Problem kann durch Speicherung der Datasets im ‚fixed‘-Format umgangen werden, allerdings ist es dadurch nicht mehr möglich, Teilbereiche von Datasets direkt auf der Festplatte zu selektieren und nur die selektierten Bereiche zur Bearbeitung in den Arbeitsspeicher zu laden. Stattdessen erfordert das ‚fixed‘-Format immer den Import des gesamten Datasets, also des DataFrames für einen Monat, was zu einem verhältnismäßig hohen Bedarf an Arbeitsspeicher führt. Da der Arbeitsspeicher in 32-Bit Anwendungen jedoch auf maximal 3 GB begrenzt ist, funktioniert die entwickelte Methodik ausschließlich auf 64-Bit Systemen mit entsprechender 64-Bit Python-Version. Für die Kompatibilität mit ArcMap ist somit die zusätzliche Installation des 64-Bit Background Processing notwendig.

Vorbereitung der Datenauswertung

Die Verarbeitung der RADKLIM-Daten erfordert eine sehr häufige Wiederholung bestimmter Algorithmen, insbesondere im Hinblick darauf, dass alle anhand der Zwischendaten entwickelten Routinen erneut mit den final reanalysierten RADKLIM-Produkten ausgeführt und weiterentwickelt werden mussten. Aus diesem Grund wurden alle wiederholt verwendeten Algorithmen als möglichst flexible Python-Funktionen definiert und zunächst in einem eigenen Python-Modul abgelegt. Alle Python-Skripte, die im Rahmen des Projektes entwickelt wurden, greifen auf die Funktionen dieses Moduls zu, um den Programmcode möglichst kurz, übersichtlich, einheitlich strukturiert und gut modifizierbar zu gestalten.

So enthält dieses Modul beispielsweise verschiedene Funktionen zum Importieren der DataFrames aus der HDF5-Datei. Diese Funktionen ermöglichen das automatische Laden und Zusammenfügen der

DataFrames mehrerer Monate oder Jahre sowie beispielsweise ein Downsampling der Zeitreihe zu Tages-, Monats- oder Jahresniederschlagssummen.

Alle Funktionen und Skripte zur Analyse der RADKLIM-Daten sind so ausgelegt, dass sie auf der HDF5-Datei mit den monatlichen DataFrames und diesen Importfunktionen basieren und als Ergebnis einen DataFrame oder eine pandas Series erzeugen. Bei Letzterer handelt es sich im Grunde um einen NumPy-Array mit Beschriftung, sodass bspw. für jeden Niederschlagswert die dazugehörige ID für die Verortung im GIS mitgeführt werden kann.

GIS-Schnittstelle

Wie in Kap. 2.1.2 beschrieben, ist eine direkte Anbindung zu ArcGIS unverzichtbar für die im Rahmen des Projektes durchgeführten Auswertungen und die Kartenerstellung.

Als Schnittstelle für den Import von Rastern aus ArcMap in Python wurde ein Teil der Methodik zum Zuschneiden der Daten als verallgemeinerte Funktion programmiert, welche ein beliebiges Raster als eindimensionalen NumPy-Array importiert und alle NoData-Werte entfernt (Abb. 2 c) – e). Wird diesem importierten Array ein ID-Array des identischen Untersuchungsgebietes als Index zugewiesen und beides als pandas Series gespeichert, kann jede Rasterzelle eindeutig lokalisiert werden.

Die Schnittstelle für den Export von Rastern basiert auf dem ID-Raster des Untersuchungsgebietes. Die Exportfunktion konvertiert zunächst das ID-Raster in einen eindimensionalen Array, allerdings werden die NoData-Werte nicht entfernt, um die rechteckige Matrix beizubehalten, die für den Aufbau eines neuen Rasters in ArcGIS notwendig ist (Abb. 2 c) – d). Zudem werden einige Metainformationen zwischengespeichert, bspw. die Koordinate des linken unteren Eckpunktes, das Koordinatensystem und die Anzahl der Zeilen und Spalten.

Für den Export wird eine Series benötigt. Diese entsteht immer bei Auswahl einer DataFrame-Zeile, da die Spaltenbeschriftung – also die Rasterzellen-ID – grundsätzlich mitgeführt wird.

Die Funktion fügt nun jeweils die zu exportierenden Werte an der Stelle ihrer ID in den ID-Array ein und exportiert das Raster mit Hilfe der gespeicherten Metainformationen zurück in ArcGIS.

Da zahlreiche Analysefunktionen einen DataFrame als Ausgabe erzeugen, wurde auf Basis der Exportfunktion zudem eine weitere Funktion programmiert, die nacheinander alle Zeilen eines DataFrames als Raster Datasets in eine neue File-Geodatabase exportiert. Dabei werden die Namen der Raster automatisch aus dem Index des DataFrames abgeleitet.

Darüber hinaus wurden Funktionen geschrieben, um pandas DataFrames oder einzelne Spalten per Join-Befehl mit Shapefiles verknüpfen und umgekehrt Attributtabellen bzw. dbf-Tabellen als DataFrames importieren zu können.

Die entwickelte Methodik ermöglicht somit z. B. mit dem Aufruf von nur zwei Funktionen eine Geodatenbank mit Jahresniederschlagsrastern aus den RADKLIM-Daten in der HDF5-Datei zu erzeugen. Zunächst können mit einer Funktionen automatisch alle monatlichen DataFrames des Untersuchungszeitraums 2001 – 2015 eingelesen, zusammengefügt und zu Jahresniederschlägen aufsummiert werden. Das Ergebnis dieser Funktion ist ein DataFrame mit einer Zeile pro Jahr, welcher

anschließend mit einer der Exportfunktionen in eine neue Geodatenbank mit einem Raster Dataset pro Jahr exportiert werden kann.

2.1.4 Veröffentlichung der entwickelten Routinen – die Python-Bibliothek *radproc*

Die in Kapitel 2.1.2 vorgestellte und von KREKLOW (2019) erweiterte und aktualisierte Recherche zu vorhandenen Software-Tools zur Verarbeitung von RADOLAN- und RADKLIM-Daten zeigte ein Fehlen von frei verfügbaren Open Source-Werkzeugen zur automatisierten Prozessierung derartiger klimatologischer Zeitreihen auf. Um einen Beitrag zur Verbesserung der Nutzbarkeit der Radardaten zu leisten, erfolgte Ende Mai 2018 die Veröffentlichung einer Auswahl entwickelter Funktionen und Methoden als Python-Bibliothek (KREKLOW 2018). Die GIS-kompatible Open Source Software namens *radproc* ist auf dem Python Package Index PyPI sowie auf GitHub frei unter einer modifizierten MIT-Lizenz verfügbar. Eine vollständige Dokumentation einschließlich Tutorials und Installationsanleitung ist unter www.pqweb.uni-hannover.de zu finden. Zudem erfolgten Präsentationen der entwickelten Methodik für unterschiedliche potenzielle Nutzergruppen, u. a. auf dem Workshop „Starkregen und Sturzfluten“ der TU & LMU München im Juni 2018, der deutschen IALE (International Association for Landscape Ecology) Jahrestagung 2018 in Hannover und dem Deutschen Kongress für Geographie 2019 in Kiel.

2.2 Ombrometerdaten

Zur Plausibilitätsprüfung der RADKLIM-Daten (Kap. 3) werden Niederschlagsdaten von Ombrometerstationen benötigt. Hierzu wurden sowohl die Stationsdaten des Landesmessnetzes des HLNUG als auch die Daten der hessischen Bodenmessstationen des DWD für den Projektzeitraum von 2001 bis 2015 von DWD und HLNUG bereitgestellt, wobei jedoch nicht alle Stationen den gesamten Untersuchungszeitraum abdecken.

Beide Datensätze wurden mit Hilfe von Python-Skripten eingelesen und in pandas DataFrames konvertiert, deren Format identisch zu den DataFrames der RADOLAN-Daten ist, sodass alle Auswertungen im Rahmen des Projektes mit möglichst geringem Aufwand ebenfalls für die Stationsdaten durchgeführt werden konnten.

2.2.1 Stationsdaten des DWD

Die Messdaten aller Ombrometerstationen des DWD in Hessen wurden bereits Ende Oktober 2016 kostenfrei in minütlicher Auflösung zur Verfügung gestellt. Für jede der insgesamt 78 Messstationen liegen zwei Textdateien vor. Eine Datei enthält jeweils die Messdaten selbst, während die andere Datei die Bestandsdaten mit zahlreichen Metainformationen einschließlich Name, Koordinaten, Höhe ü. NN und Informationen zum abgedeckten Messzeitraum der Station enthält.

Darüber hinaus wurden eine Excel-Tabelle und eine PDF-Datei zur Beschreibung des Formats der Messdaten mitgeliefert.

Der erste Bearbeitungsschritt bestand in der Erstellung eines Shapefiles mit den Ombrometern des DWD. Mit Hilfe eines Python-Skriptes wurden dafür aus den einzelnen Bestandsdateien zunächst die

Stationsnamen, Koordinaten und Höhenangaben extrahiert und in einer neuen Textdatei zusammengefasst. Diese wurde anschließend in MS Excel importiert und die Koordinatenangaben, welche in Grad und Minuten vorliegen, in die von ArcMap benötigte Einheit Dezimalgrad umgerechnet:

$$\text{Dezimalgrad} = \text{Grad} + \frac{\text{Minuten}}{60}$$

Aus der Excel-Tabelle wurde mit Hilfe des ArcMap-Befehls *Add XY Data* schließlich ein Punkt-Shapefile im Koordinatensystem WGS 1984 erzeugt, welches alle Ombrometerstationen des DWD in Hessen enthält.

Die minütlich aufgelösten Ombrometerdaten des DWD liegen in einem fest definierten periodischen Datenformat vor, welches in den bereitgestellten Beschreibungsdateien dokumentiert ist und als MR90 bezeichnet wird.

Jede Zeile der Textdatei beginnt mit einem Metainformationsblock bestehend aus Stationskennung und –nummer, dem Datum im Format JJJMMTT sowie der Stunde in Mitteleuropäischer Zeit (MEZ) im Format HH. Anschließend enthält jede Zeile die Messdaten für eine Stunde, eingeteilt in sechs identisch formatierte 10-Minuten-Blöcke, jeweils beginnend um hh:50 der Vorstunde.

Folglich enthält bspw. eine Zeile mit der Stundenangabe 10 die Niederschlagsmessungen des Zeitraums 09:50 – 10:49 Uhr MEZ.

Jede Textdatei wurde mit Hilfe eines Python-Skriptes zeilenweise eingelesen, interpretiert und mit einem minütlichen Zeitindex versehen in einen einspaltigen DataFrame konvertiert. Nach dem Einlesen aller Zeilen wurde der DataFrame anschließend zu 5-Minuten-Intervallen aggregiert (*Downsampling*), um Speicherplatz zu sparen und die zeitliche Auflösung an die am höchsten aufgelösten RADKLIM-Daten – das YW-Produkt – anzugleichen. Die Zeitzone wurde zudem in UTC (MEZ - 1) konvertiert, da die RADKLIM-Daten für diese Zeitzone vorliegen.

Abschließend wurden die einspaltigen DataFrames der einzelnen Stationen zu einem DataFrame mit einer Spalte pro Station zusammengeführt, auf den Zeitraum 01.01.2001 – 31.12.2015 (UTC) beschnitten und analog zur Radarklimatologie als monatliche HDF5-Datasets gespeichert.

Die entwickelten Funktionen zur Prozessierung der DWD-Ombrometerdaten wurden als eigenes Modul in *radproc* veröffentlicht (Kap. 2.1.4).

2.2.2 Stationsdaten des HLNUG

Für das Projekt wurden minütlich aufgelöste Messungen aller Ombrometerstationen des HLNUG als Textdateien (.zrx) in aperiodischem Format zur Verfügung gestellt. Dabei handelt es sich um 57 Stationen mit minütlicher Auflösung. Für zwei Stationen wurden zudem 15-minütig aufgelöste Daten zur Verfügung gestellt.

Im Anschluss an einen leicht variierenden fünfzeiligen Header mit Metainformationen bestehen die Textdateien aus zwei mit einem Leerzeichen getrennten Spalten, welche einen Zeitstempel in Mitteleuropäischer Zeit (MEZ) und den gefallen Niederschlag in mm enthalten (Tab. 1).

Tab. 1: Das Datenformat der HLNUG-Ombrometer

Datenformat	20080409035300	0.03
Beschreibung	Zeitstempel: JJJMMTTHHmms	Niederschlag, Genauigkeit: 0,01 mm
Bedeutung	09.04.2008 03:53:00 Uhr MEZ	0,03 mm

In diesem aperiodischen Format sind jeweils nur Zeitstempel für tatsächlich gefallene Niederschläge oder bekannte Fehlzeiten vorhanden, wobei Beginn und Ende eines Niederschlagsereignisses jeweils mit einem Zeitstempel mit dem Niederschlagswert 0.00 gekennzeichnet sind. Darüber hinaus gibt es für jeden niederschlagsfreien Tag einen Zeitstempel mit dem Wert 0.00 sowie für bekannte Ausfallzeiten des Ombrometers einen Zeitstempel mit dem NoData-Wert -777 pro Tag.

Auf Basis dieser Annahmen wurde analog zum Vorgehen bei den DWD-Stationen zunächst ein einspaltiger DataFrame pro Station mit den vorhandenen Zeitstempeln erstellt. Um das Datenformat der HLNUG-Stationen an das periodische, fünfminütig aufgelöste Format der DWD-Stationen und RADKLIM-Daten anzugleichen, wurde jeder DataFrame zunächst in eine periodische Frequenz mit minütlicher Auflösung konvertiert. Dazu wurde die Methode ‚ffill‘ verwendet, welche die entstehenden Lücken in der Zeitreihe vorwärts füllt, d. h. der letzte vorhandene Wert (0.00 nach einem Niederschlag bzw. an jedem niederschlagsfreien Tag, NaN in Ausfallzeiten) wird in alle folgenden Lücken übernommen bis der nächste vorhandene Wert angetroffen wird.

Wenn alle Niederschlagsereignisse korrekt mit 0.00-Werten abgegrenzt sind, werden somit alle Zeiträume zwischen den Niederschlägen mit 0.00 aufgefüllt und alle Fehlzeiten bis zum nächsten vorhandenen Tag bzw. Niederschlagsereignis mit NaN aufgefüllt, was zumindest eine tagesscharfe Abgrenzung zwischen niederschlagsfreien Phasen und Fehlzeiten ermöglicht.

Anschließend wurden alle einspaltigen Dataframes auf eine 5-minütige Auflösung aggregiert, in die Zeitzone UTC konvertiert, auf den Zeitraum 01.01.2001 – 31.12.2015 (UTC) beschnitten und zu einem DataFrame zusammengeführt.

Bei einer ersten Plausibilitätsprüfung durch Aggregation der Daten zu Monats- und Jahresniederschlagssummen stellte sich jedoch heraus, dass einige Stationen unrealistisch hohe Summenwerte aufwiesen. Eine genauere Analyse ergab, dass in den Originaldaten an einigen Stellen die Abgrenzung von Niederschlagsereignissen durch einen 0.00-Wert fehlt und zudem einige monatelange Lücken in den Daten vorhanden sind, sodass bspw. bei der Station Dipperz statt 0.00 oder NaN der letzte angegebene Wert von 0.03 mm über einen Zeitraum von rund viereinhalb Monaten zwischen April und August 2008 für jede Minute der Datenlücke eingesetzt wurde. Das Resultat waren viel zu hohe Monatssummen von 925 bis 1339 mm in diesem Zeitraum.

Um die Auswirkung vorhandener, nicht dokumentierter Datenlücken zu minimieren, wurde daraufhin mit Hilfe eines Python-Skripts eine Korrektur der Original-Stationen Daten vorgenommen. Es wurden neue Textdateien geschrieben, in denen nach jedem Niederschlagsereignis eine abschließende Zeile mit entsprechendem Zeitstempel und 0.00-Wert eingefügt wurde, sofern diese zuvor nicht vorhanden war. Für die Station Dipperz wurde somit bspw. die markierte Zeile eingefügt, wodurch beim

Resampling der eingefügte Wert 0.00 in den Datenlücken fortgeführt wird und sich Monatssummen von 0 mm ergeben.

20080409035200 0.00

20080409035300 0.03

20080409035400 0.00

20080822000100 0.00

20080822152200 0.00

Anschließend wurde die oben beschriebene Einleseroutine für die korrigierten Stationsdateien erneut ausgeführt und der korrigierte Datensatz ebenfalls als monatliche HDF5-Datasets abgespeichert.

2.3 Erstellung einer Starkregendatenbank

2.3.1 Hintergrund

Unter Position 1 des Projektantrags wurde die Recherche von herausragenden Schäden aufgrund von Starkregenereignissen aus unterschiedlichen Medien wie Pressemitteilungen und Feuerwehr-Webseiten vereinbart. Diese unabhängigen Daten sollen zur Plausibilitätsprüfung der RADKLIM-Daten und der Starkregen-Hinweiskarten beitragen.

Ursprünglich waren für diesen Zweck die Feuerwehr-Einsatzdaten der FLORIX-Datenbank vorgesehen, welche vom Hessischen Ministerium für Inneres und Sport zur Verfügung gestellt wurde, allerdings weist diese Datenbank einige Schwachpunkte auf.

Die als Excel-Tabelle vorliegende Datenbank enthält die jährliche Anzahl der Feuerwehreinätze auf Gemeindeebene für die Jahre 2012 bis 2014. Die Einsätze sind untergliedert in die vier Kategorien Hochwasser, Sturm, Unwetter und sonstiger Wassereinsatz. Problematisch ist, dass diese Einsatzkategorien nicht eindeutig definiert und voneinander abgegrenzt sind, wodurch sie von unterschiedlichen Bearbeitern verschiedenartig ausgelegt werden können und keine zweifelsfreie Identifikation von Starkregen erlauben. Darüber hinaus gibt es Zweifel an der Vollständigkeit der Daten, da fehlende Einträge in der FLORIX-Datenbank nicht zwangsläufig bedeuten, dass es keine Einsätze gab. Möglicherweise wurden die Einträge nur nicht vorgenommen. Somit hängt die Qualität der Statistik auch von der Einsatzdokumentation der jeweiligen Feuerwehren ab, worauf beispielsweise ein sehr wahrscheinlich künstliches Einsatzmaximum im Landkreis Offenbach hindeutet.

Zudem ist der durch die FLORIX-Datenbank abgedeckte Zeitraum von 2012 – 2014 nur sehr kurz und die jährliche Auflösung der Daten zu niedrig. Die sehr grobe zeitliche Auflösung führt dazu, dass sich nur besonders extreme Einzelereignisse wie bspw. das Hochwasser Ende Mai/Anfang Juni 2013 im Werra-Meißner Kreis sowie das Starkregenereignis im Juli 2014 in Wiesbaden in den Daten abbilden. Des Weiteren gibt es für den Zeitraum 2005 – 2013 jährliche FLORIX-Daten auf Landkreisebene. Diese Zahlen stimmen in den überlappenden Jahren 2012 und 2013 jedoch nicht mit den aggregierten Daten der Gemeindeebene überein, was deren Verwendung ebenfalls schwierig macht. Anhand der FLORIX-

Daten generell auf zeitlich und räumlich sehr variable Starkregenereignisse zu schließen wäre somit sehr spekulativ und nicht zielführend.

Aus den genannten Gründen wurde eine Erweiterung der Datengrundlage für den gesamten Untersuchungszeitraum 2001 - 2016 mit dem primären Ziel einer höheren zeitlichen Auflösung als notwendig erachtet und eine eigene Recherche im Rahmen des Projektes vereinbart. Durch die Einbeziehung unterschiedlicher Datenquellen sollen die oben aufgeführten Kritikpunkte an der Repräsentativität der Einsatzdokumentation der Feuerwehren bei der Recherche bestmöglich berücksichtigt werden.

2.3.2 Recherche und Klassifikation von Starkregenereignissen

Es wurden verschiedene Meldungen und Berichte aus Zeitungen, Online-Portalen und Feuerwehr-Webseiten zusammengetragen, die entweder eine konkrete Nennung von Starkregen und deren Folgen (vollgelaufene Keller, überflutete Straßen, Hochwasser, Erdbeben, Erdrutsche, Schlammlawinen) oder unterschiedliche Indikatoren wie Blitzeinschläge, Unwetter oder Sturmschäden enthalten.

Darüber hinaus wurden der Tabelle die Ergebnisse der KLIMPRAX-Befragung zu den Erfahrungen der hessischen Gemeinden mit Starkregen hinzugefügt.

Auf Grund des sehr variablen Detailgrads der Meldungen ist es in vielen Fällen nicht möglich, die Ereignisse exakt zu verorten. Daher wurde die Tabelle in Bezug auf die räumliche Auflösung auf Gemeindeebene angelegt. Um dies zu erreichen, wurden Berichte, in denen Starkregen, Feuerwehreinsätze oder Schäden in mehreren Gemeinden erwähnt wurden, einmal für jede genannte Gemeinde in die Tabelle eingetragen. Alle recherchierten Ereignisse liegen darüber hinaus mit der Angabe des Tages, z. T. auch der Uhrzeit vor, während die Ergebnisse der Befragung nur Monatsangaben enthalten.

Wegen der zu stark abweichenden zeitlichen Auflösung und der uneindeutigen Einsatzkategorien, deren Starkregenbezug wegen fehlender Datumsangaben nicht mit anderen Quellen verifiziert werden kann, wurden die FLORIX-Daten im Gegensatz zur Befragung nicht in die Tabelle aufgenommen.

Eine Übersicht über die verwendeten Quellen ist Tab. 2 zu entnehmen.

Tab. 2: Übersicht der verwendeten Quellen

Quellentyp	Am häufigsten verwendete Quellen	Anzahl verschiedener Websites	Beschreibung der Quellen
Feuerwehr	http://www.feuerwehr-baunatal.de/ http://www.feuerwehr-frankfurt.de http://www.feuerwehr-friedberg.de	25	Einsatzarchive auf den Internetseiten verschiedener Feuerwehren
Presse	http://112-magazin.de http://www.echo-online.de http://www.faz.net	27	Websites zu Feuerwehreinsätzen, meistens für einzelne Landkreise oder Regionen, Websites von Zeitungen
Befragung (Quelle: HLNUG)	-	-	Befragung der hessischen Gemeinden zu ihren Erfahrungen mit Starkniederschlägen
Unwetterdatenbank	www.unwetterdatenbank.de	1	Öffentliches Online-Archiv für Unwetterereignisse, Eintragung möglich für Jedermann

Aus der Recherche ergibt sich ohne die Daten der Gemeindebefragung eine Liste von rund 460 Meldungen (724 mit Befragung) mit Angaben zu Gemeinde, Landkreis, Kurzbeschreibung, Datenquelle und Datum. Dabei wurde darauf geachtet, das Format der Tabelle GIS-kompatibel zu gestalten, damit die Daten nach weiterer Aggregation in pandas per Join-Befehl an die Gemeinde- oder Landkreis-Shapefiles angehängt, räumlich ausgewertet und kartographisch dargestellt werden können.

Die Tabelle wurde anschließend nach Datum sortiert, jeweils alle Ereignisse eines Tages bzw. unmittelbar aufeinander folgender Tage gemeinsam betrachtet und in Klassen eingeteilt. Die Klassifizierung wurde als notwendig erachtet, um die große Heterogenität der Informationen und die variierende Seriosität der genutzten Quellen einordnen und eine Gewichtung der Meldungen vornehmen zu können. Die Klassifikation ist in Tab. 3 detailliert beschrieben und eine Begründung der Notwendigkeit ist Tab. 4 zu entnehmen.

Tab. 3: Klassifikation der recherchierten Starkniederschlagsereignisse

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

Neben der Klassifizierung wurde eine Abgrenzung und Aggregation der recherchierten Meldungen zu Ereignissen vorgenommen, wobei die Einträge der Befragung nicht mit einbezogen wurden, da sie ohne Datumsangabe nicht eindeutig einem bestimmten Ereignis zugeordnet werden können. Dabei wurden Meldungen von zwei aufeinander folgenden Tagen jeweils als ein Ereignis angesehen, da anzunehmen ist, dass diese Starkregen aus der gleichen Wetterlage resultieren, bspw. wenn ein Frontensystem im Laufe einer Nacht über Hessen hinweg zieht. Darüber hinaus gab es einige Meldungen von abendlichen Gewittern, bei denen die Aufräumarbeiten bis zum nächsten Tag andauerten und aus den Berichten der Tag des Niederschlags nicht eindeutig hervor geht.

2.3.3 Ergebnisse und Diskussion

Die Recherche umfasst ohne Befragung insgesamt 178 potenzielle Starkregenereignisse verteilt über 239 der 426 Gemeinden, wovon 105 Ereignisse den zuverlässigen Klassen 2 und 3 zugeordnet wurden. Die erstellte Tabelle weist im Vergleich zu den FLORIX-Daten einige grundlegende Verbesserungen auf, darunter die Abdeckung des vollständigen Untersuchungszeitraums, eine zeitliche Auflösung auf Ereignisebene, eine breite Recherche mit Einbindung unabhängiger Quellen und eine Bewertung des Starkregenbezugs der Meldungen. Dennoch ist festzuhalten, dass die Repräsentativität dieser Datenbank ebenfalls kritisch zu sehen ist, da während der Recherche einige Schwierigkeiten auftraten, die in Tab. 4 zusammengefasst sind.

Tab. 4: Schwierigkeiten der Starkregenrecherche und deren Auswirkungen

Schwierigkeiten der Recherche	Mögliche Erklärung	Auswirkung
<ul style="list-style-type: none"> - Dokumentation von Unwetterereignissen in großen Städten meist besser als in kleinen Städten oder auf dem Land - nicht alle Feuerwehren haben eine Webseite mit Einsatzdokumentation - Qualität der Internetseiten von Feuerwehren variiert sehr stark (nicht immer Suchfunktion vorhanden, Auflistung von Schlagworten vs. Ausführlicher Einsatzbericht) - einige (v. a. lokale) Zeitungen erfordern ein Abonnement zur Einsicht ihrer Artikel - oftmals werden nicht alle betroffenen Gemeinden einzeln genannt, sondern es gibt Aussagen wie „in weiten Teilen des Landkreises“ - Kategorie „Hochwasser“ bedeutet nicht, dass es in dieser Gemeinde bzw. an diesem Tag einen Starkregen gab 	<ul style="list-style-type: none"> - höhere Vulnerabilität durch mehr Menschen und Sachwerte in Städten → höhere Schäden - evtl. besser ausgestattete Feuerwehren oder mehr Berufsfeuerwehren in Städten → mehr personelle und finanzielle Mittel für Dokumentation und Pflege einer Webseite 	<ul style="list-style-type: none"> - Datenbank nicht vollständig und ländliche Gemeinden erscheinen unterrepräsentiert - mutmaßlich eingeschränkte räumliche Repräsentativität der Datenbank, wenn belastbare Aussagen zur Starkregenhäufigkeit pro Gemeinde getroffen werden sollen → bildet eher Anzahl der Schadensfälle ab - Recherche sehr zeitaufwendig bei fehlender Suchfunktion der Feuerwehrarchive
<ul style="list-style-type: none"> - Archive von Feuerwehren und Presse decken unterschiedliche Zeiträume ab und reichen oftmals nicht bis 2001 zurück - Unwetterdatenbank verfügt erst seit 2006 über größere Anzahl Meldungen - Zeitungsartikel und Nachrichtenbeiträge damals noch nicht oder inzwischen nicht mehr online verfügbar. Videos aus lokalen Nachrichten z. T. während Recherche aus Mediatheken gelöscht 	<ul style="list-style-type: none"> - stete Zunahme der Internetnutzung, -verbreitung und -geschwindigkeit seit 2001 - mehr Online-Angebote von Zeitungen und Fernsehsendern - einfachere und günstigere Möglichkeiten, eine eigene Homepage zu erstellen 	<ul style="list-style-type: none"> - Anzahl der Meldungen und Berichte für aktuellere Zeiträume höher als für frühere Zeiträume. - Trendaussagen zur zeitlichen Entwicklung der Starkregenhäufigkeit über den gesamten Untersuchungszeitraum nicht zulässig, aber Vergleich von zwei aufeinander folgenden Jahren möglich - Abbildung der Saisonalität (Anzahl der Ereignisse pro Monat) scheint gegeben
<ul style="list-style-type: none"> - Seriosität der Quellen sehr unterschiedlich und z. T. schwer einzuschätzen - Definition der Kategorien z. T. uneindeutig oder subjektiv → z. B. Abgrenzung „Unwetterschäden“ und „Sturmschäden“ schwierig, Unwetter kann Starkregen und Sturmschäden beinhalten 	<ul style="list-style-type: none"> - Unwetterdatenbank ist ein von den Feuerwehren unabhängiger Indikator für Starkregenereignisse, aber die Einordnung als Starkregen ist subjektiv. Einträge der Datenbank können gleichermaßen von Laien oder Experten stammen. 	<ul style="list-style-type: none"> - nicht alle Meldungen sind in gleichem Maße seriös - einige Meldungen sind als Indikator für Starkregen zu betrachten, andere als Beleg → Klassifikation der Ereignisse, um diese Qualitätsunterschiede abzufangen

Eine statistische Auswertung der recherchierten Datenbank belegt die Aussagen aus Tab. 4 im Hinblick auf die Einschränkung der zeitlichen Aussagekraft der Recherche. In Abb. 3 ist die Anzahl der recherchierten Meldungen pro Jahr unterteilt nach Art der Datenquelle dargestellt. Es zeigt sich ein deutlicher Trend zu einer besseren Dokumentation von Unwetterereignissen in den letzten Jahren mit einem sprunghaften Anstieg bei Presse und Unwetterdatenbank im Jahr 2006. Die einzige markante Ausnahme dieser Entwicklung stellt das Jahr 2015 dar, in dem aus allen vier Datenquellen deutlich weniger Meldungen vorliegen als 2014 und 2016. Dies deutet auf ein Jahr mit sehr wenigen Starkregen hin.

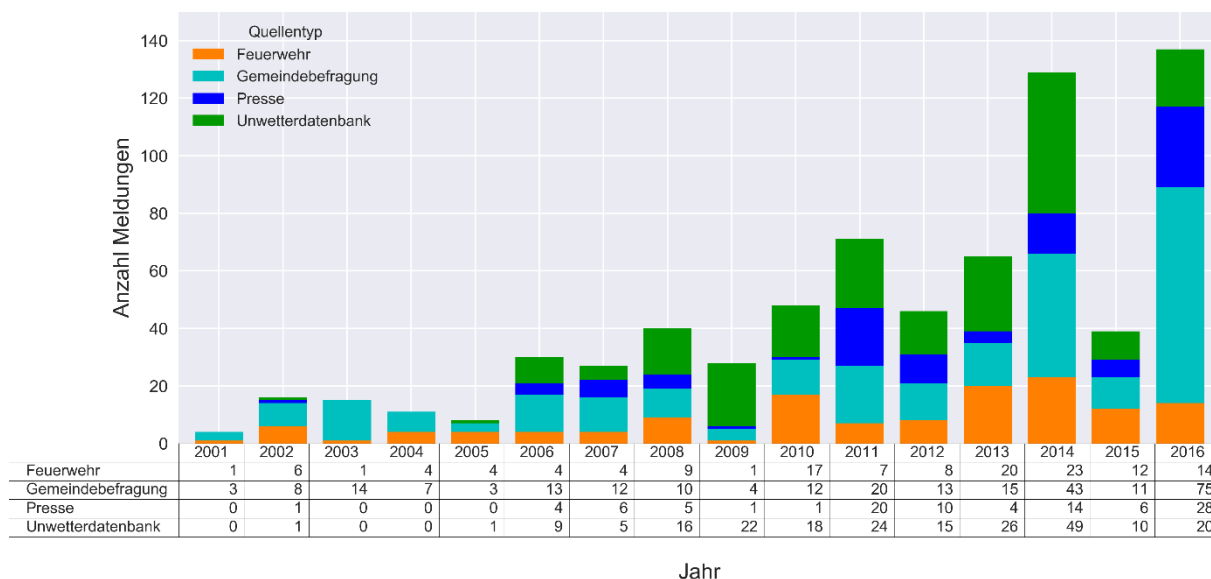


Abb. 3: Anzahl der Starkregelmeldungen pro Jahr unterteilt nach Art der Datenquelle

Laut DWD (2016b) war es im Jahr 2015 verbreitet erheblich zu trocken und „besonders die Mitte Deutschlands litt ab Februar unter einer Dürre, die im Sommer auch den Süden erfasste und mit kurzen Unterbrechungen bis zum Jahresende andauerte“ (DWD 2016b, S. 6).

In DWD (2015) werden Frühjahr und Sommer des Jahres 2014 hingegen als sehr wechselhaft mit vielen Starkregen und Gewittern beschrieben und auch die FLORIX-Datenbank enthält für das Jahr 2014 deutlich mehr Feuerwehreinsätze als für 2012 und 2013 (Karte 2). Die Ergebnisse der Starkregenrecherche scheinen die interannuelle Variabilität der Starkniederschlagshäufigkeit folglich durchaus widerzuspiegeln, wodurch ein Vergleich aufeinander folgender Jahre zulässig erscheint. Zudem zeigt die monatliche Anzahl der Meldungen eine deutliche „Starkregensaison“ von Mai bis August (Abb. 4), welche durch PEUBNER (2013) mit RADOLAN-Daten ebenfalls identifiziert werden konnte.

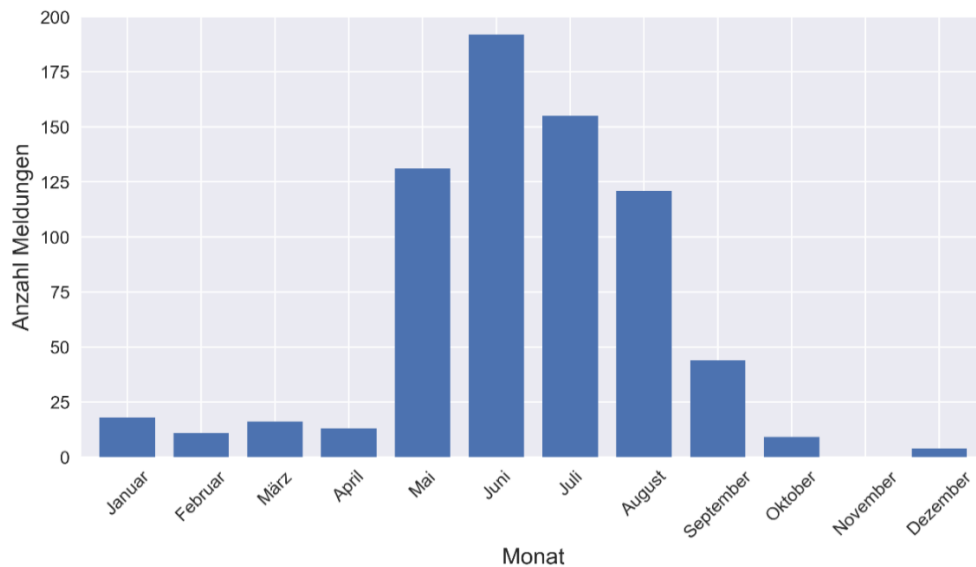
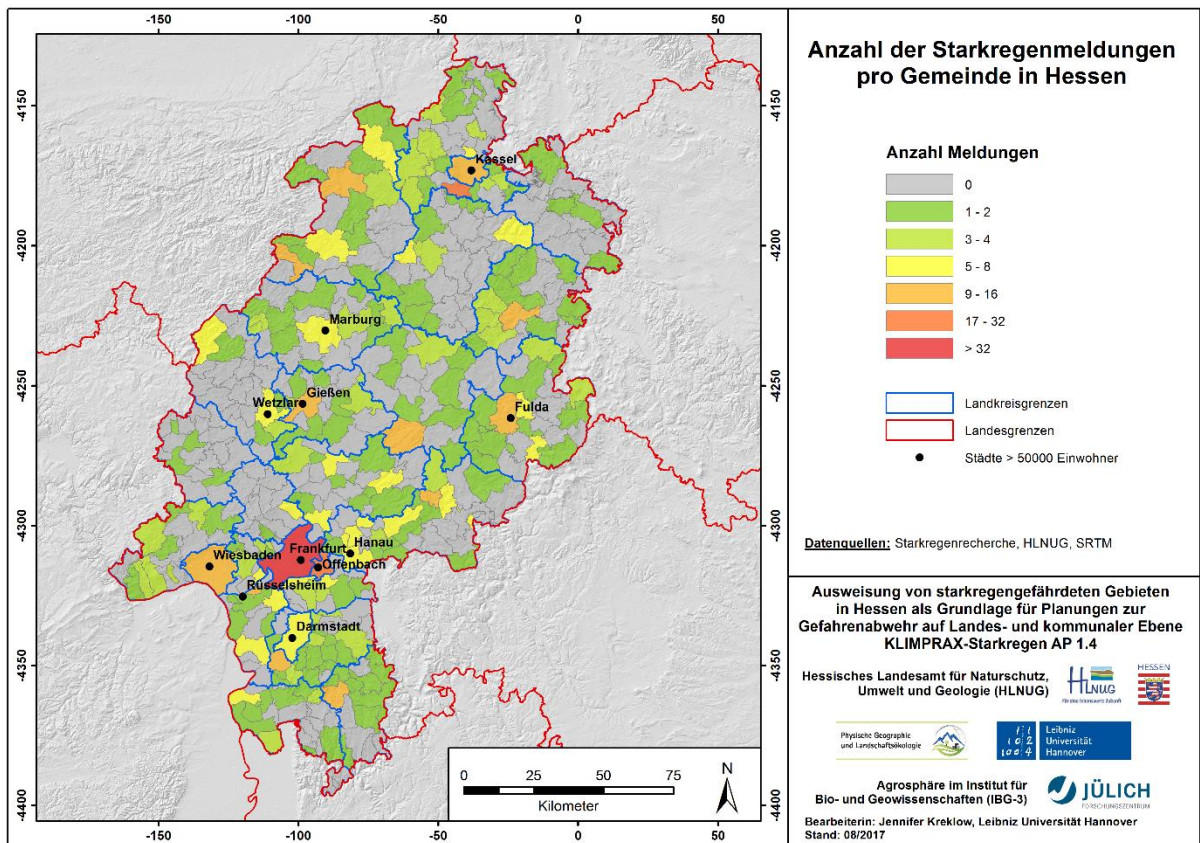


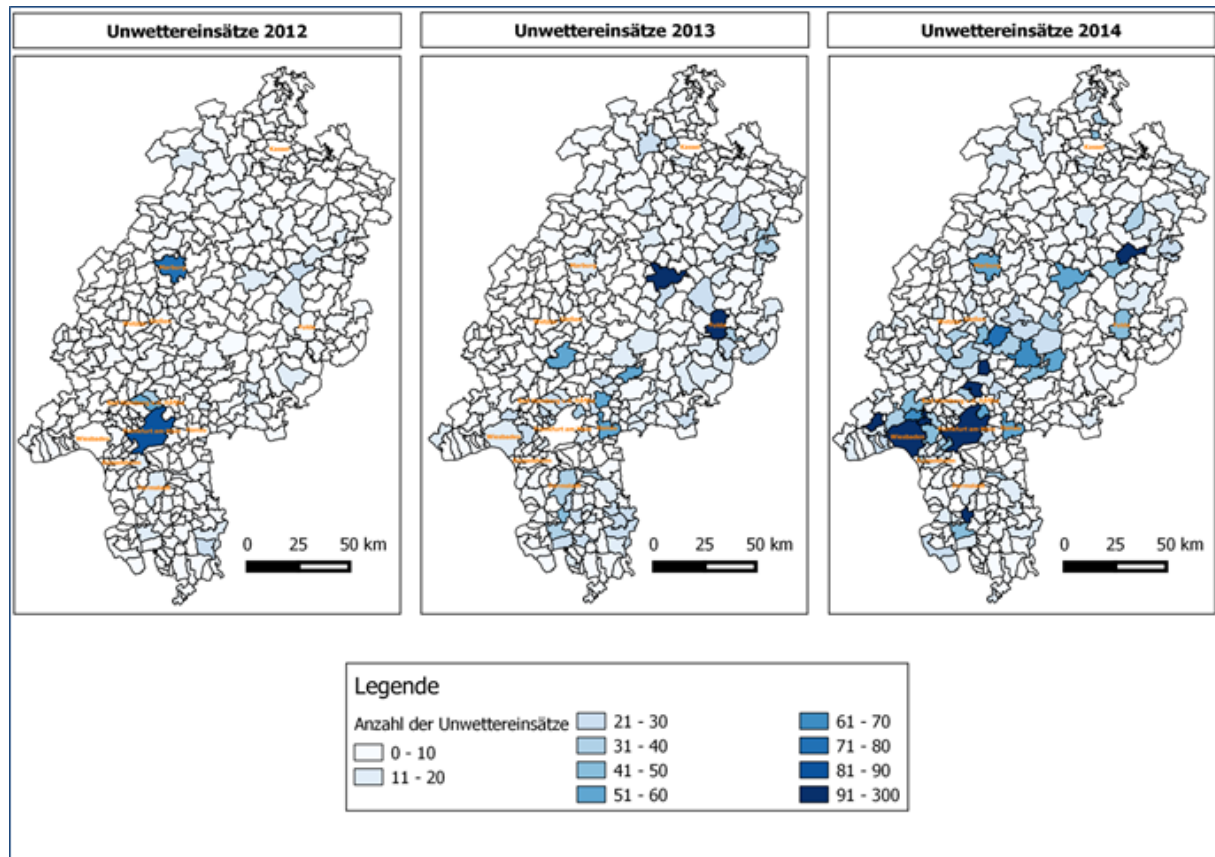
Abb. 4: Anzahl der Starkregenmeldungen pro Monat, Zeitraum 2001 - 2016

Die räumliche Verteilung der Starkregenmeldungen pro Gemeinde ist in Karte 1 dargestellt. Es zeigt sich eine sehr geringe Anzahl von Gemeinden mit Starkregenmeldungen im Hochtaunuskreis, Lahn-Dill-Kreis, Werra-Meißner-Kreis, Schwalm-Eder-Kreis sowie im Landkreis Limburg-Weilburg. Auffällig ist hingegen die bereits in Tab. 4 beschriebene Häufung von Meldungen in urbanen Räumen. Mit Ausnahme von Rüsselsheim weisen alle hessischen Städte mit mehr als 50.000 Einwohnern mindestens fünf Starkregenmeldungen auf und liegen damit deutlich über dem Durchschnitt von 3,03 Meldungen pro Gemeinde mit mindestens einem Eintrag. Die meisten Meldungen weist Frankfurt am Main (36) auf, gefolgt von Baunatal (18), Offenbach am Main (17) und Wiesbaden (16).

In dieser Hinsicht decken sich die Daten weitgehend mit der FLORIX-Datenbank, wie der Vergleich von Karte 1 und 2 zeigt. Beide Karten zeigen überdurchschnittlich hohe Werte u. a. in Frankfurt, Wiesbaden, Fulda, Marburg und Bad Hersfeld. Die deutlich niedrigeren Summen in Karte 1 sind primär darauf zurückzuführen, dass der Begriff „Starkregenmeldung“ einen Bericht über das Auftreten eines Starkregenereignisses oder -indikators in der entsprechenden Gemeinde unabhängig von der dadurch verursachten Anzahl an Feuerwehreinsätzen beschreibt. Beispielsweise ist ein schweres Unwetter, welches am 14./15.06 2016 im Rhein-Main-Gebiet für Schäden sorgte, für die Stadt Offenbach durch sieben Meldungen belegt (vier Einträge aus der KLIMPRAX-Befragung und drei unterschiedliche Presseberichte), allerdings wird in einem Zeitungsartikel der FNP von über 160 Notrufen bei der Feuerwehr berichtet. Die FLORIX-Daten hingegen beschreiben die Anzahl der unwetterbedingten Feuerwehreinsätze und nicht die deutlich geringere Anzahl der Berichte über Starkregenereignisse.



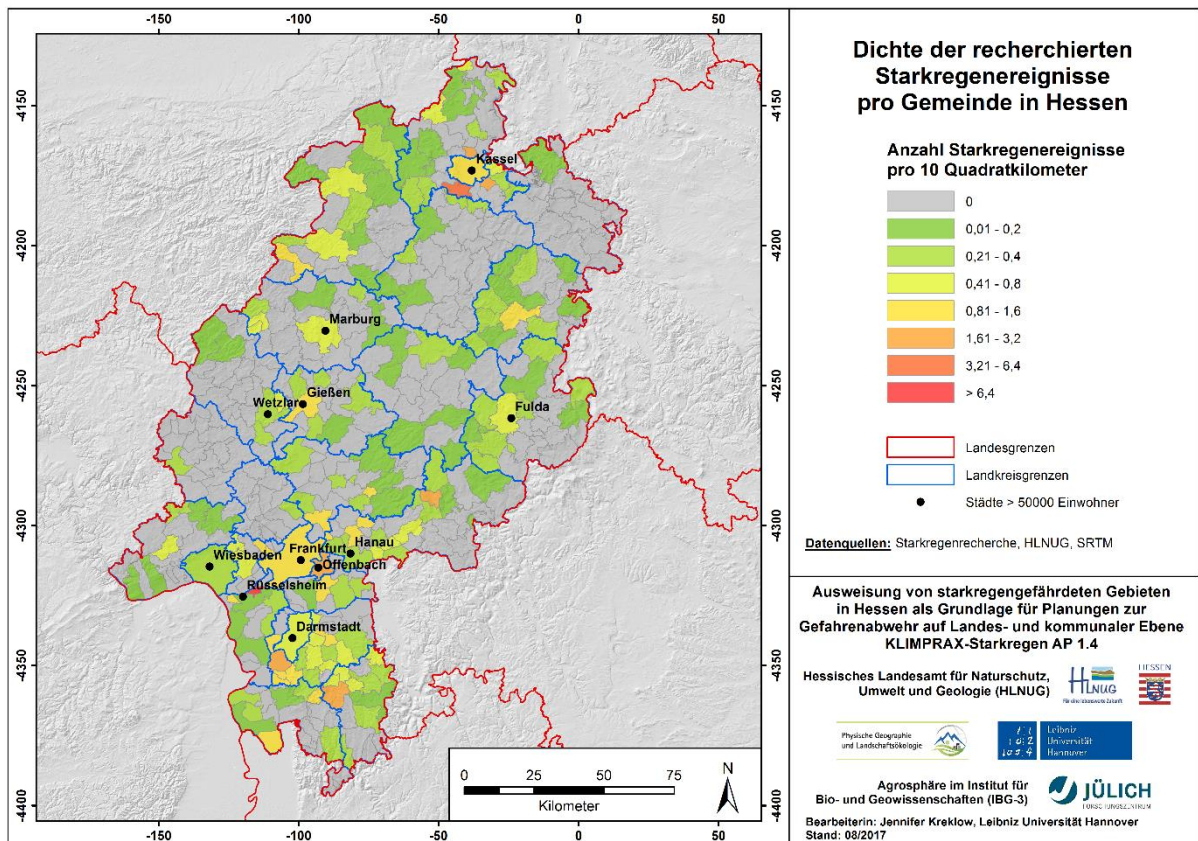
Karte 1: Anzahl der Starkregenmeldungen pro Gemeinde in Hessen



Karte 2: Unwettereinsätze pro Gemeinde 2012-2014 laut FLORIX-Datenbank (WINTERRATH 2016)

Im Hinblick auf die künstlichen Maxima in urbanen Räumen ist neben der mutmaßlich besseren Dokumentation ebenfalls zu berücksichtigen, dass insbesondere die kreisfreien Städte im Vergleich zu den meisten ländlicheren Gemeinden erheblich größer sind. Um dem Einfluss beider Faktoren Rechnung zu tragen, wurde die Dichte der Starkregenereignisse pro Gemeinde ermittelt, in diesem Fall die Anzahl der Ereignisse jeder Gemeinde pro 10 Quadratkilometer (Karte 3). Der Begriff Ereignis bedeutet, dass unabhängig von der Anzahl an Meldungen (Berichten über diesen Starkregen) und Feuerwehreinsätzen jeder Starkregen nur einmal pro Gemeinde in die Statistik eingeht. Die Anzahl der Ereignisse wurde durch manuelle Abgrenzung und Nummerierung aller Einzelereignisse aus den recherchierten Meldungen erzeugt, was bei den FLORIX-Daten auf Grund der schlechteren zeitlichen Auflösung nicht möglich ist. Für den Vergleich zu Starkregenhäufigkeiten, die aus Niederschlagsdaten berechnet werden, erscheint die Betrachtung von Ereignissen jedoch deutlich sinnvoller als die von Meldungen oder Feuerwehreinsätzen.

Die höchste Dichte der Starkregenereignisse weist mit 7,94 Ereignissen/10 km² die Gemeinde Raunheim auf, gefolgt von Baunatal (3,4), der Stadt Offenbach (2,45) und Vellmar (2,15). Die Maxima sind folglich nicht mehr ausschließlich in den urbanen Räumen vorzufinden und die räumliche Verteilung zeigt eine deutlich gleichmäßigere Struktur als die Summe der Meldungen. Die Städte Gießen (1,1), Frankfurt (1,09) und Kassel (0,84) liegen oberhalb des Mittelwerts von 0,51 Ereignissen/10 km², während u. a. Darmstadt (0,49), Marburg (0,48), Fulda (0,48) und

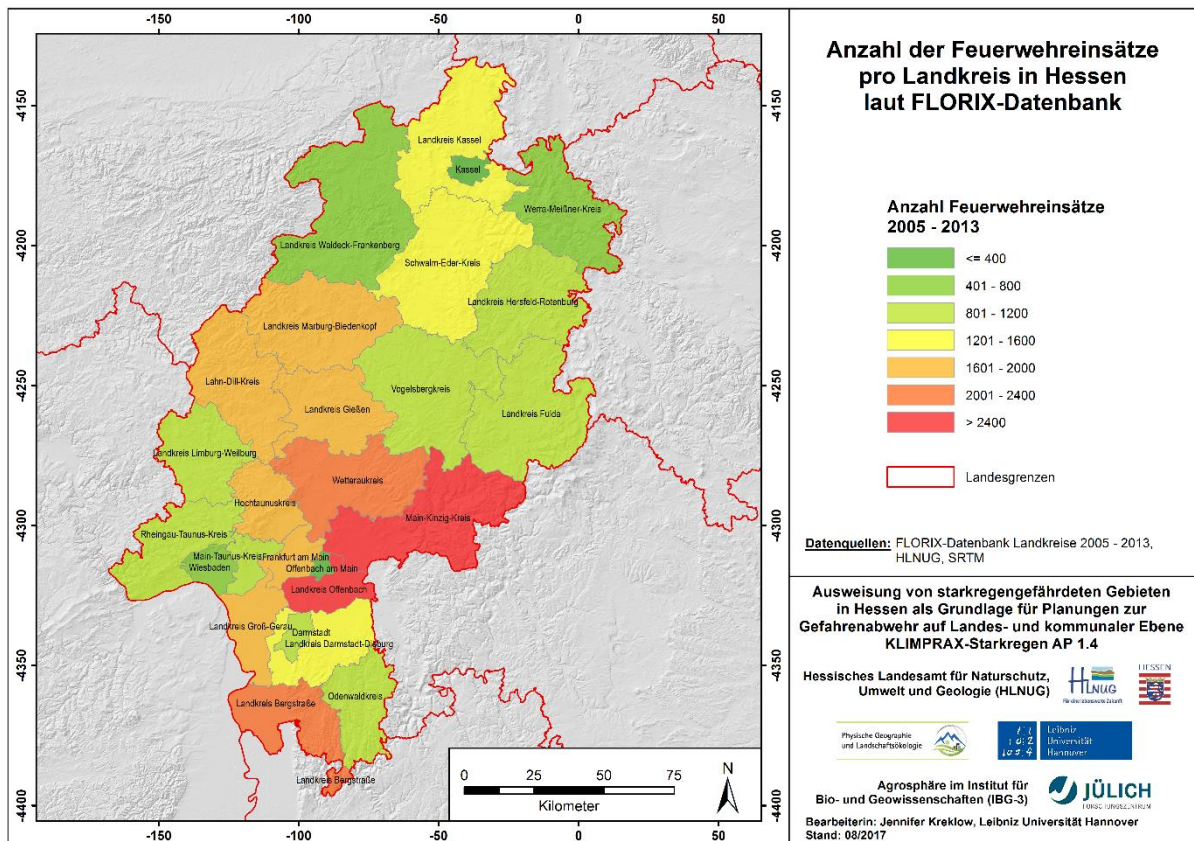


Karte 3: Dichte der recherchierten Starkregenereignisse pro Gemeinde in Hessen

Wiesbaden (0,34) knapp darunter liegen. Erkennbar sind zudem Häufungen von Gemeinden mit Ereignissen im Nordwesten und Süden Hessens sowie im östlichen Bereich um Vogelsberg und Knüll. Die Verwendung der Dichte der Starkregenereignisse als Kenngröße führt somit durchaus zu einer Abschwächung der durch umfangreiche Dokumentation und große Gemeinden verursachten künstlichen Maxima. Die schlechte Datenverfügbarkeit in einigen Regionen bleibt jedoch ein Problem, welches bei der Verwendung derartiger Daten aus zweiter Hand kaum zu beheben ist.

Ein Vergleich der FLORIX-Einsatzdaten auf Landkreisebene von 2005 – 2013 mit den recherchierten Meldungen und den daraus abgeleiteten Ereignissen pro Landkreis kann den Karten 4 – 6 entnommen werden. Die FLORIX-Datenbank enthält die Gesamtanzahl der Feuerwehreinsätze jedes Landkreises, welche jedoch nicht notwendigerweise einen Unwetter- oder Starkregenbezug haben müssen. Zudem fehlen die Einträge einiger Jahre für bestimmte Landkreise und insbesondere für die kreisfreien Städte. Für Frankfurt beispielsweise liegen für die Jahre 2005, 2006 und 2013 keine Zahlen vor, es ist allerdings auszuschließen, dass es in allen drei Jahren keine Feuerwehreinsätze gab. Gleichermaßen fehlt das Jahr 2006 für die Stadt Offenbach und die Jahre 2012 und 2013 für die Stadt Kassel. Darüber hinaus gibt es für die Städte Kassel und Wiesbaden jeweils zwei Jahre mit angeblich nur 2 bzw. 3 Feuerwehreinsätzen, was ebenfalls deutlich zu wenig erscheint.

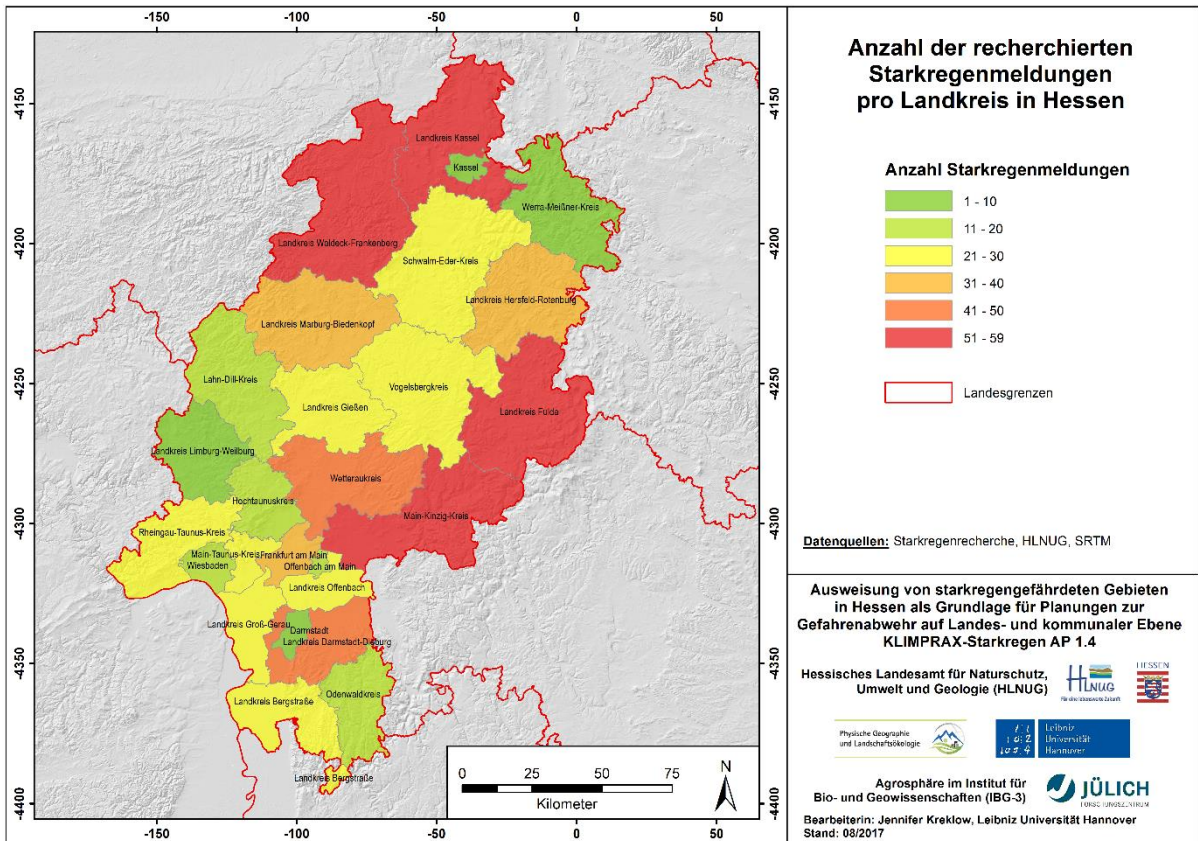
Der Vergleich dieser sehr unterschiedlichen Datengrundlagen – welche zudem unterschiedliche Zeiträume abdecken - ist zwar schwierig, allerdings weisen die räumlichen Verteilungen durchaus einige ähnliche Muster auf.



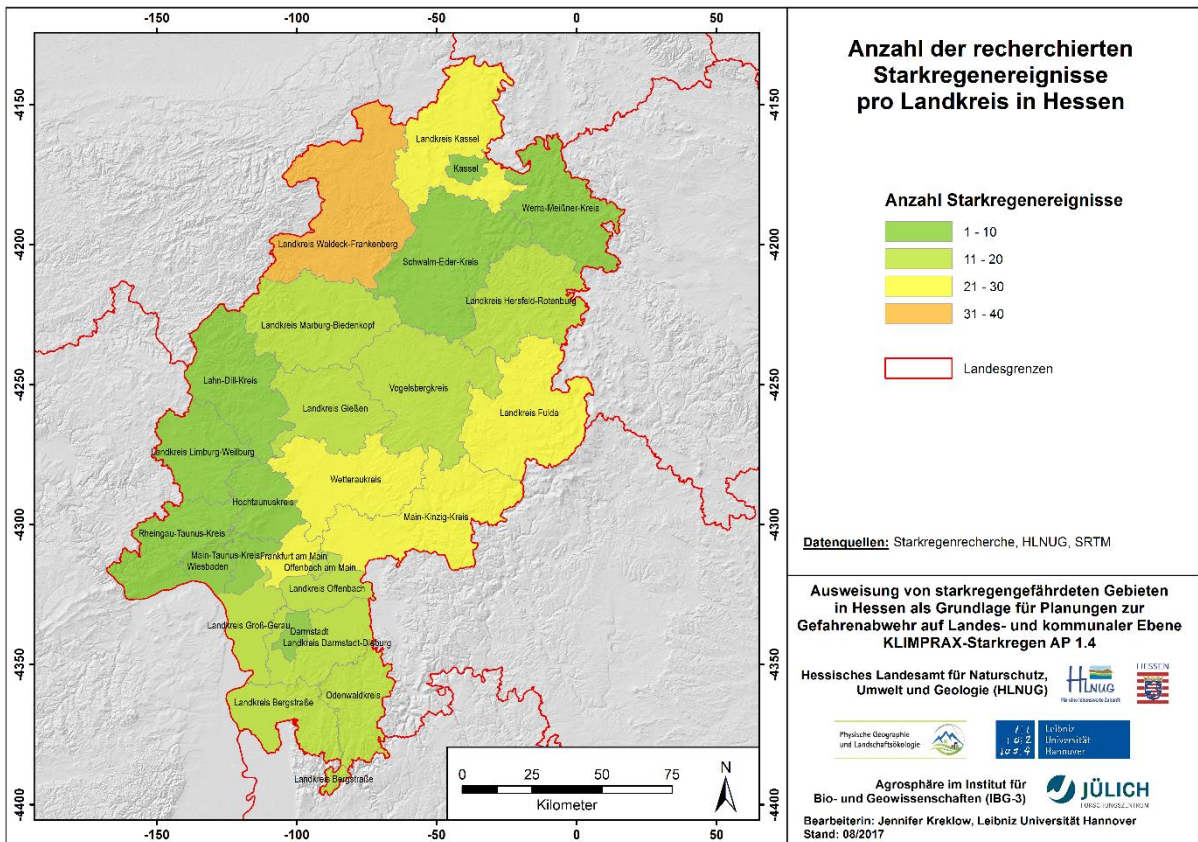
Karte 4: Anzahl der Feuerwehreinsätze pro Landkreis in Hessen laut FLORIX-Datenbank (müssen keinen Starkregenbezug haben)

Alle drei Datensätze zeigen übereinstimmend geringe Werte im Werra-Meißner-Kreis und im Westen Hessens sowie in den kreisfreien Städten. Letztere werden auf Grund der eingeschränkten Vergleichbarkeit durch ihre deutlich geringere Flächengröße und die beschriebene Unvollständigkeit der Einträge jedoch nicht weiter betrachtet. Überdurchschnittlich hohe Werte sind übereinstimmend in den Landkreisen Kassel, Wetterau und Main-Kinzig zu verzeichnen. Für den Main-Kinzig-Kreis liegen sehr viele Feuerwehreinsätze (3232) und Starkregenmeldungen (58) vor, die aus den Meldungen abgeleitete Anzahl an Ereignissen (27) ist jedoch nahezu identisch zu den Kreisen Kassel (28) und Wetterau (26). Dies kann sowohl auf eine umfangreiche Dokumentation als auch auf sehr großräumige oder intensive Starkregen hindeuten, da weder die Intensität noch die flächenhafte Ausdehnung des Niederschlags in der Anzahl der Ereignisse pro Landkreis abgebildet wird.

Markante Widersprüche zeigen die Datensätze in den Landkreisen Offenbach, in dem bei den FLORIX-Daten eine sehr gute Dokumentation der Feuerwehren angenommen wird (Kap. 2.2.1), sowie im Landkreis Waldeck-Frankenberg. Für letzteren sind zwar für alle Jahre Einträge in FLORIX vorhanden, allerdings liegt die Summe mit 639 Einsätzen weit unter dem Durchschnitt von 1157 Einsätzen. Bei den recherchierten Meldungen hingegen weist Waldeck-Frankenberg mit 51 den vierthöchsten Wert auf und verzeichnet mit 31 sogar die meisten Ereignisse. Weniger stark ausgeprägt zeigt sich ein ähnlicher Gegensatz für den Landkreis Fulda, welcher zumindest teilweise durch fehlende FLORIX-Einträge für die Stadt Fulda in den Jahren 2005 und 2010 zu erklären ist.



Karte 5: Anzahl der recherchierten Starkregenmeldungen pro Landkreis in Hessen



Karte 6: Anzahl der recherchierten Starkregenereignisse pro Landkreis in Hessen

Trotz der aufgeführten Einschränkungen ermöglicht die erstellte Datenbank eine gute qualitative Übersicht über das Auftreten und die Auswirkungen von Starkregenereignissen. Insbesondere die relativ umfangreich dokumentierten Ereignisse der Klasse 3 können dazu dienen, die Abbildung von Starkregen durch die RADKLIM-Daten anhand von Einzelfallstudien einzuschätzen.

Während der Starkregenrecherche wurde unter Betrachtung der beschriebenen Fehlerquellen der Eindruck gewonnen, dass eine solche Datenbank bei einheitlicher Einsatzdokumentation aller Feuerwehren – bspw. durch Bereitstellung eines zentralen Servers mit Zugang und identischer Eingabemaske für alle Feuerwehren - ein äußerst wertvoller Datensatz zur Unterstützung von Starkregenanalysen wäre.

2.4 Sonstige Geodaten

2.4.1 Windenergieanlagen

Die Vorstudie hat gezeigt, dass Windparks mit mindestens drei Windenergieanlagen einen signifikanten Einfluss auf die vom Radar erfassten Reflektivitäten haben, was durch unzureichende Korrekturen zu erheblichen Cluttern und Überschätzungen des Niederschlags in den RADOLAN-Daten geführt hat (PEUßNER 2013). Ein wichtiger Aspekt der Plausibilitätsprüfung im Rahmen dieses Projektes ist folglich die Analyse des Einflusses von Windenergieanlagen auf die reprozesierten RADKLIM-Daten. Zu diesem Zweck wurde vom HLNUG eine Excel-Tabelle mit Daten zu allen Windenergieanlagen Hessens bereitgestellt. Die Tabelle enthält neben den Koordinaten auch Informationen zu Höhe, Rotordurchmesser, Leistung und Datum der Inbetriebnahme der Anlagen.

Aus dieser Excel-Tabelle wurde mit Hilfe der ArcMap-Funktion *Add XY Data* ein Punkt-Shapefile erstellt.

2.4.2 Flugrouten des Frankfurter Flughafens

Zusätzlich zum Effekt der Windenergieanlagen zeigten sich während der Vorstudie sogenannte Negativspeichen, also linienhafte Strukturen mit ungewöhnlich geringen Niederschlagswerten, die auf Frankfurt zulaufen (Peußner 2013). Es wird angenommen, dass diese Speichen im Zusammenhang mit stark frequentierten Flugkorridoren des Frankfurter Flughafens stehen. Um zu überprüfen, ob dieser Effekt in der Radarklimatologie korrigiert wurde bzw. um diesen Effekt näher zu untersuchen, wurden Informationen zu den Flugrouten um den Flughafen angefragt und vom HLNUG bzw. Fraport zur Verfügung gestellt.

Bei dem bereitgestellten Shapefile handelt es sich um einen Auszug aus dem Datenerfassungssystem von Fraport, in dem die Flugbewegungen der sechs verkehrsreichsten Monate des Jahres 2015 dargestellt sind (Lochmann 2016). Das Shapefile enthält unter anderem die Anzahl der Flugbewegungen pro 180 Tage (6 – 22 Uhr) sowie der Bewegungen pro 180 Nächte (22 – 6 Uhr).

3 Projektbaustein 2 – Entwicklung und Anwendung eines Konzepts zur Plausibilisierung der Radarklimatologie

3.1 Niederschlagssummen

Bei der Erfassung von Niederschlag mittels Wetterradar können zahlreiche Fehlerquellen auftreten, deren Auswirkungen erst durch Aufsummierung über längere Zeiträume ersichtlich sind, sich aber dennoch auf die Erfassung von Starkregen auswirken (PEUBNER 2013, WINTERRATH et al. 2017). Dies betrifft insbesondere die Identifikation linearer Bereiche geringerer Reflektivität, sogenannte Speichen, in denen der Radarstrahl teilweise von Hindernissen geblockt wird. Zudem ist erst in klimatologischen Auswertungen eine Abnahme der Niederschlagsmenge mit zunehmender Geländehöhe sowie mit zunehmender Entfernung zum Radar zu beobachten, welche auf „die Vergrößerung des Messvolumens, die Zunahme der Dämpfung entlang des Radarstrahls sowie das „Overshooting“, also die Messung oberhalb der niederschlagsbildenden Wolken,“ (WINTERRATH et al. 2017: 63f) zurückzuführen sind.

Aus diesem Grund wurden im Rahmen der Plausibilitätsprüfung zunächst Niederschlagssummen unterschiedlicher Zeiträume für alle vorliegenden Datensätze berechnet, um eine erste Einschätzung der Datenqualität und eine Identifikation fehlerbehafteter Bereiche vornehmen zu können. Die untersuchten Daten umfassen die RW- und YW-Daten der Reanalyseläufe 2017.002 (2001 - 2016) und 2017.003 (2001 - 2014) der Radarklimatologie (Kap. 2.1.1) sowie die von DWD und HLNUG bereitgestellten Messdaten aller hessischen Ombrometerstationen, welche für den Zeitraum von 2001 bis 2015 vorliegen, an vielen Stationen jedoch nicht die gesamte Periode abdecken.

Da die Daten des Reanalyselaufs 2017.003 aus AP 1.2 als Grundlage für alle Auswertungen und Ableitungen innerhalb des Projektes vorgesehen waren, wurde der Schwerpunkt der Plausibilitätsprüfung zunächst auf diesen Datensatz gelegt. Zudem sollte der Einfluss der zusätzlichen Aneichstationen und somit der Unterschied zu Reanalyse 2017.002 untersucht werden.

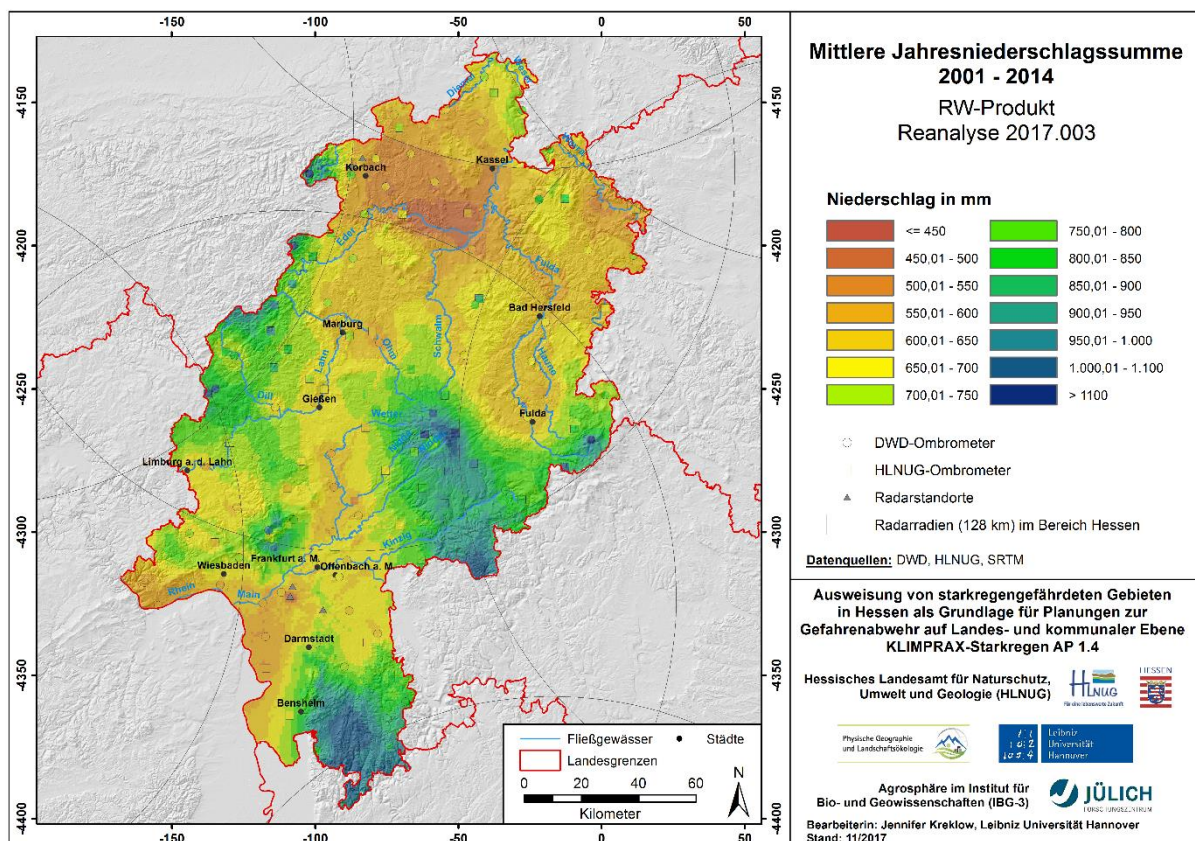
Auf Grund des großen analysierten Datenumfangs wurde nur eine kleine Auswahl der Auswertungen als Kartendarstellungen aufbereitet und in den vorliegenden Bericht aufgenommen. Einen detaillierten bundesweiten Vergleich zwischen RADOLAN, RADKLIM-Reanalyseversion 2017.002 und Ombrometerdaten ermöglicht zudem der Vergleichsdatensatz von KREKLOW et al (2019a) beschrieben in KREKLOW et al (2019b).

3.1.1 Niederschlagsquantifizierung und räumliche Verteilung

Karte 7 zeigt die mittlere Jahresniederschlagssumme für den von RADKLIM-Reanalyselauf 2017.003 (fortan als RW003 bzw. YW003 bezeichnet) abgedeckten Zeitraum 2001 bis 2014. Zunächst ist festzuhalten, dass sich die Niederschlagshöhen der RADKLIM-Daten in einem realistischen Rahmen zwischen 427,6 und 1112,9 mm mit einem Mittelwert von 700,0 mm bewegen. Die Niederschlagssummen der Ombrometer reichen von 502,2 bis 1201 mm und weisen somit etwas höhere statistische Kennwerte auf. Der aus insgesamt 128 Stationen gemittelte Jahresniederschlag für Hessen beträgt 753,2 mm. Bei Betrachtung der 128 Radarpixel, in denen sich die Ombrometerstationen befinden, zeigen sich bei RW003 Niederschlagssummen von 474,4 bis 981,2 mm mit einem Mittelwert von 702,3 mm. Es zeigt sich somit, dass die mittlere Niederschlagssumme aller Radarpixel Hessens nahezu identisch zum Mittelwert an den 128 Pixeln an Ombrometerstationen ist, der Mittelwert der Stationsmessungen jedoch um ca. 50 mm höher ist. Eine detaillierte Übersicht dazu ist Tabelle 1 zu entnehmen.

Die Analyse der räumlichen Niederschlagsverteilung untermauert die Erkenntnis, dass die mittleren Niederschlagssummen in RW003 etwas unterschätzt werden, und liefert zudem einige Erklärungen dafür.

Zunächst einmal ist auffällig und positiv zu bewerten, dass in RW002 und RW003 keine signifikant überhöhten Ausreißerwerte, sog. Clutterpixel, identifiziert werden konnten, wie sie in den ursprünglichen RADOLAN-Produkten noch vielfach insbesondere an Windparks zu beobachten waren (PEUBNER 2013). Die Zunahme der Niederschlagssumme mit zunehmender Geländehöhe ist deutlich



Karte 7: Mittlere Jahresniederschlagssumme Hessens im Zeitraum 2001 - 2014 auf Basis von RADKLIM-Reanalyselauf RW 2017.003 und Ombrometerstationen

erkennbar (Karte 7) und wesentlich besser abgebildet als in den RADOLAN-Daten, allerdings werden insbesondere am Oberen Vogelsberg, in Gladenbacher Bergland und Westerwald sowie im Knüll-Gebirge und der Rhön nicht die Niederschlagshöhen der Bodenstationen erreicht. In den südlicheren Höhenzügen am Odenwald, dem Büdinger Wald und im Spessart stimmen die Werte beider Messmethoden hingegen gut überein.

Im Bereich der Wetterau, an der Westseite des Vogelsbergs und im Rhein-Main-Gebiet weisen die RADKLIM-Daten hingegen teilweise etwas höhere Niederschlagssummen auf als die Ombrometer.

Tab. 5: Statistische Kennwerte der mittleren Niederschlagssummen von RADKLIM- und Ombrometer-Daten für den Zeitraum 2001 - 2014

Niederschlagsmittel 2001-2014		Datenquelle				
Zeitraum	Statistik	RW003	RW002	Ombrometer	RW003 an Ombrometern	RW002 an Ombrometern
		n=23320	n=23320	n=128	n=128	n=128
Jahr	Maximum	1112,9	1107,6	1201,3	981,2	1025,4
	Mittelwert	700,0	704,9	753,2	702,3	710,2
	Minimum	427,6	424,9	502,2	474,4	490,2
	Standardabw.	113,6	114,3	146,2	120,0	120,7
Sommerhalbjahr (Mai - Oktober)	Maximum	574,2	566,5	587,2	531,3	535,5
	Mittelwert	388,3	390,6	395,1	388,7	392,1
	Minimum	241,2	240,4	99,4	265,1	265,5
	Standardabw.	49,2	49,6	61,0	55,2	55,6
Winterhalbjahr (November - April)	Maximum	614,7	606,6	693,3	560,9	536,15
	Mittelwert	306,3	308,4	338,5	309,4	311,3
	Minimum	176,1	174,9	104,4	196,7	196,3
	Standardabw.	71,5	71,7	96,5	73,4	70,2

Allerdings zeigen sich nach wie vor einige Strukturen, die auf unkorrigierte Messfehler des Radars zurückzuführen sind. Die auffälligste Struktur ist ein Bereich unterdurchschnittlicher Werte in Nordhessen, der sich etwa zwischen Kassel, Korbach und Homberg erstreckt und klar durch die 128 km-Radien der angrenzenden Radarstationen abgegrenzt ist. Dieser Bereich wird nur vom Radar Flechtdorf abgedeckt, welches jedoch am 29. April 2014 abgeschaltet und zum 12. November 2014 durch ein neues Radar ersetzt wurde. Ein Ersatz wurde als nicht notwendig erachtet, da das Gebiet von den umliegenden Radaren vollständig abgedeckt wird (WEIGL 2014a, WEIGL 2014b). Da für RADOLAN der maximale Radarradius von 150 km verwendet wurde, traf dies zu, allerdings wurde der berücksichtigte Radius bei der Reanalyse auf 128 km reduziert, u. a. um Artefakte durch Entfernungsdämpfung zu reduzieren. Somit entsteht im reanalysierten RADKLIM-Komposit eine Lücke, die es zuvor nicht gab. In diesem Zeitraum zeigen die Monatssummen beider Reanalyseläufe eine klare Abgrenzung dieses unabgedeckten Bereichs mit Niederschlagssummen von 0 mm von Mai bis Oktober 2014. Im Juli 2014 deuten die räumlichen Niederschlagsmuster zudem auf einen zeitweisen Ausfall des

Radars Hannover hin, hierzu ist in den RADOLAN-Informationen jedoch keine Information hinterlegt. Der Einfluss dieser Ausfälle auf den räumlich gemittelten Jahresniederschlag für das Bundesland Hessen ist mit rund 3 mm weniger im Vergleich zum Gebietsmittelwert 2001 - 2013 zwar gering, der Einfluss auf die mittleren Jahresniederschlagssummen an den entsprechenden Pixeln ist jedoch signifikant und im Kartenbild deutlich erkennbar.

Des Weiteren sind die in den RADOLAN-Daten bereits von PEUBNER (2013) identifizierten Speichen vom Radar Frankfurt bzw. Offenthal in Richtung Nordosten noch immer vorhanden, allerdings deutlich schwächer ausgeprägt. Zudem zeigen sich vom gleichen Radar ausgehend im Lee des Taunus schwach ausgeprägt mehrere Sektoren, welche möglicherweise infolge der Korrekturalgorithmen entstanden sind, weil bspw. die Speichenkorrektur der lokalen Radardaten offenbar separat für unterschiedliche Messektoren (Azimutwinkel) vorgenommen wird.

Die Tendenz, dass die Reanalysen geringere Niederschlagssummen aufweisen als die Ombrometerstationen, bestätigt sich beim Vergleich der jährlichen Gebietsmittel der Niederschläge (Abb. 5), welcher zur Verlängerung des betrachteten Zeitraums mit RW002 durchgeführt wurde.

Mit Ausnahme des Jahres 2010 ist das Gebietsmittel der Ombrometerstationen stets höher als das von RW002, in den Jahren 2002, 2009 und 2015 liegen beide Werte sehr nah beieinander. Die größten Abweichungen liegen in den Jahren 2001 und 2007 vor, allerdings ist der Vergleich in den ersten Jahren der Zeitreihe räumlich wenig repräsentativ, da für 2001 beispielsweise die Daten von nur 23 zeitlich hoch aufgelösten Bodenstationen vorliegen, wohingegen diese Anzahl bis 2013 auf 120 Stationen ansteigt. Der Vergleich der sehr unterschiedlich großen Stichproben (23-120 vs. 23320) mit unterschiedlicher räumlicher Verteilung ist insgesamt nur eingeschränkt repräsentativ, allerdings ist die grundsätzliche Tendenz höherer Ombrometermesswerte durchgängig erkennbar und wird von den statistischen Kennwerten bei gleicher Stichprobengröße bestätigt (Tab. 5).

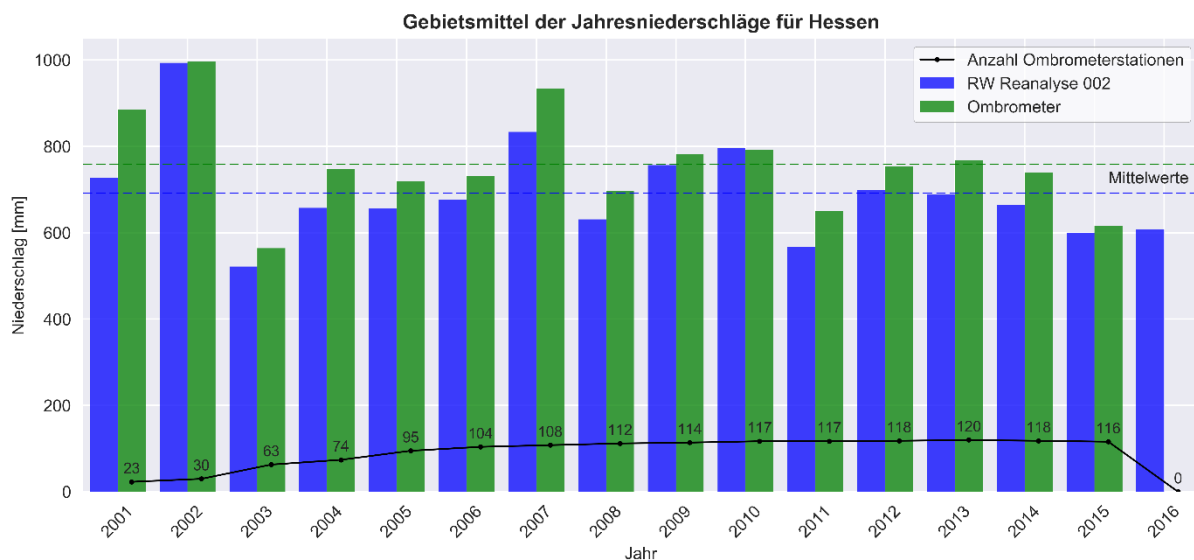


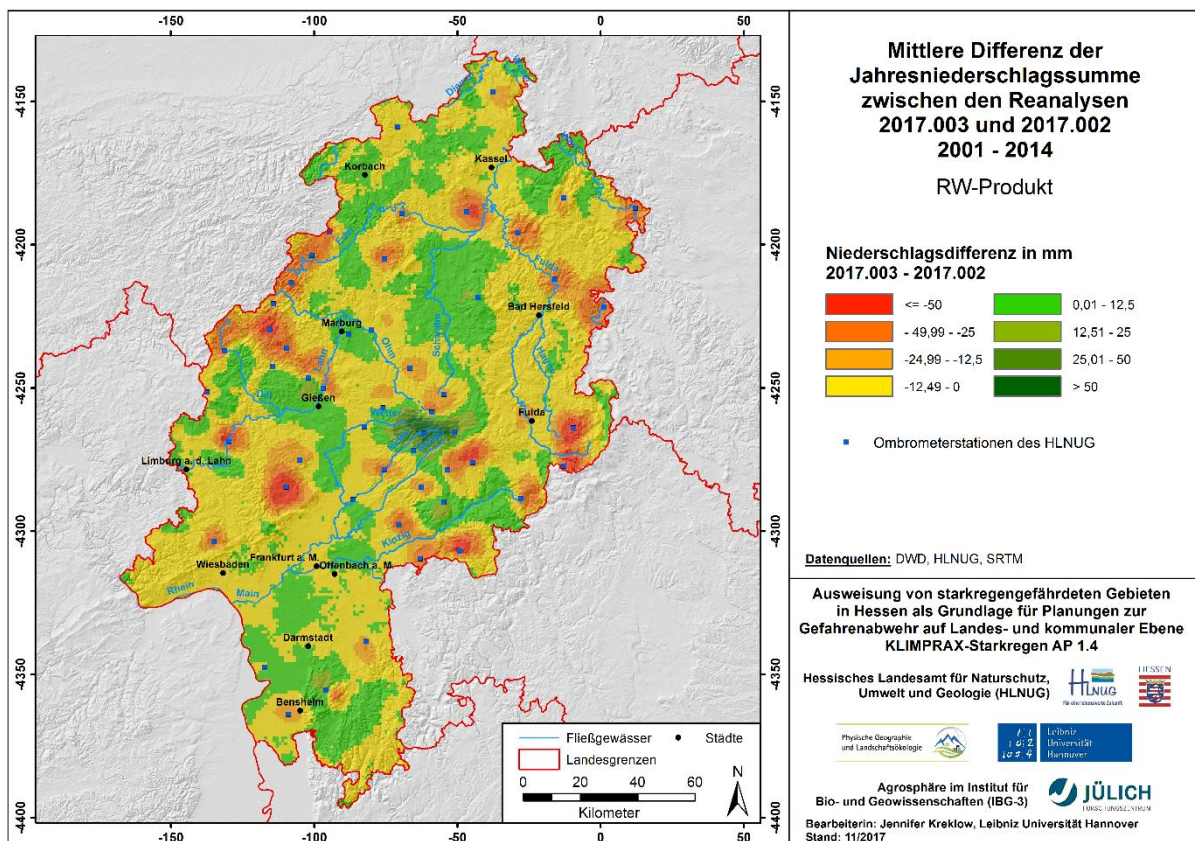
Abb. 5: Gebietsmittel der Jahresniederschläge in Hessen für Ombrometerstationen und Reanalyse 2017.002

3.1.2 Einfluss der zusätzlichen Aneichstationen

Um den Einfluss der zusätzlichen Aneichstationen des hessischen Landesmessnetzes auf die Datenqualität des Reanalyselaufs 2017.003 zu bewerten, wurden parallel die Daten aus Reanalyse 2017.002 ohne zusätzliche hessische Stationen ausgewertet und mit RW003 verglichen.

Durch die Verteilung der hessischen Stationen konnte insbesondere am Vogelsberg und im Gladenbacher Bergland eine erhebliche Verdichtung des zur Aneichung verwendeten Messnetzes erreicht werden (Karte 8), was eine verbesserte Abbildung der Niederschlagszunahme mit zunehmender Geländehöhe erwarten ließ und somit potenziell einer der Schwächen der Radarmessung entgegenwirken könnte (Kap. 3.2). Es wäre folglich zu erwarten gewesen, dass insbesondere im Bereich der HLNUG-Stationen, von denen sich ein großer Teil in den Mittelgebirgen befindet, eine Erhöhung der Werte von RW002 zu RW003 zu beobachten ist. Tab. 5 zeigt jedoch bereits, dass dies nicht der Fall ist, sondern Maximum, Mittelwert und Minimum des mittleren Jahresniederschlags von RW002 zu RW003 allesamt abnehmen.

Die Differenz der mittleren Jahresniederschlagssumme beider Datensätze zeigt, dass im unmittelbaren Umfeld zahlreicher HLNUG-Stationen eine Reduktion der Niederschlagssumme erfolgt ist, welche im Gladenbacher Bergland, im Norden des Taunus, in der Rhön und im Spessart am stärksten ausgeprägt ist (Karte 8). Die Differenz liegt zwischen einer Reduktion der Niederschlagssumme durch die HLNUG-Stationen um 108 mm und einer Erhöhung durch die zusätzlichen Stationen um 88,4 mm, welche am Vogelsberg erreicht wird. Dieser starke Einfluss ist jedoch nur punktuell um die Stationen herum zu



Karte 8: Mittlere Differenz der Jahresniederschlagssumme 2001 - 2014 zwischen den Reanalysen 2017.003 und 2017.002

beobachten, während in großen Bereichen Hessens nahezu keine Veränderung der Werte eintritt. Entsprechend ergibt sich eine mittlere Reduktion der Niederschlagshöhe von 4,9 mm unter Einbeziehung des hessischen Landesmessnetzes.

Diese Ergebnisse sind durchaus überraschend. Eine stichhaltige Begründung dafür konnte nicht gefunden werden, da der LUH keine detaillierte Dokumentation des Reanalyseaufs 2017.003 von Seiten des DWD vorliegt. Es ist somit nicht bekannt, welche HLNUG-Stationen für welche Zeiträume für die Aneichung zur Verfügung standen, wie vollständig diese Zeitreihen waren und ob daran noch Korrekturen vorgenommen worden sind. Die Auswertungen der HLNUG-Stationen im Rahmen von AP 1.4 haben gezeigt, dass die Zeitreihen einiger Stationen erhebliche Datenlücken aufweisen. Dies könnte Einfluss auf die Aneichung haben, allerdings erscheint es dennoch wenig plausibel, dass dies zu einer Reduktion der Radardaten führt.

3.2 Höhenabhängigkeit und Saisonalität

3.2.1 Hintergrund

Eine potenzielle Fehlerquelle der Radarniederschlagsmessung ist das sogenannte Overshooting, welches auftritt, wenn der Elevationswinkel des Radars so groß ist, dass der Radarstrahl die Atmosphärenschichten oberhalb des tatsächlichen Niederschlagsgeschehens erfasst. Die Folge ist eine Unterschätzung der Niederschlagsmenge. Dies tritt einerseits auf Grund der Strahlgeometrie und der Erdkrümmung mit zunehmender Entfernung vom Radar auf und andererseits im Bereich von Gebirgen, in denen der Elevationswinkel zur Vermeidung von Bodenechos und Strahlblockaden größer sein muss. Das Overshooting in größerer Entfernung zum Radar ist insbesondere im Winter bei geringeren Wolkenhöhen zu beobachten (WINTERRATH et al. 2017).

Hinzu kommt, dass feste Hydrometeore eine geringere Reflektivität aufweisen als flüssige, was ebenso zu einer Unterschätzung führen kann. Da feste Hydrometeore in höheren Atmosphärenschichten und im Winter vermehrt auftreten, hängt dieser Effekt mit dem Overshooting zusammen.

In der Vorstudie von PEUBNER (2013) zeigte sich, dass die RADOLAN-Daten im Winterhalbjahr und in bergigen Gebieten aus den genannten Gründen die größten Unterschätzungen der Niederschlagssummen aufweisen. Im Gegensatz zu oftmals klar abgrenzbaren Speichen oder Clutterpixeln an Windenergieanlagen ist eine eindeutige Abgrenzung dieser Bereiche – bspw. zur Maskierung und zum Ausschluss aus Untersuchungen – jedoch kaum möglich und in Anbetracht der großen Flächen auch nicht zielführend. Umso wichtiger ist daher die Einschätzung der daraus möglicherweise entstehenden Unsicherheiten. Aus diesem Grund erfolgte eine kombinierte Überprüfung der Datenqualität der Radarklimatologie-Produkte im Hinblick auf Effekte der Höhenabhängigkeit und Saisonalität des Niederschlags mittels verschiedener Regressionsanalysen. Es wurde für alle Untersuchungen mit Hilfe der Python-Bibliothek *statsmodels* jeweils ein lineares Regressionsmodell basierend auf der „Ordinary Least Squares“-Methode angepasst.

3.2.2 Güte der verwendeten Höheninformationen

Die Höheninformationen stammen aus einem auf 1 km² aggregierten Digitalen Geländemodell. Die Mittelung der Höhe pro RADKLIM-Pixel führt im Vergleich zu den punktuell gemessenen Höhenangaben an den Ombrometerstationen allerdings tendenziell zu einer „Auffüllung“ von Senken und Reduktion von Maxima. Um zu überprüfen, ob diese Höhenangaben für die Auswertung herangezogen werden können ohne zu einer Verfälschung des Ergebnisses zu führen, wurden Stationshöhen und die Höhenangaben der entsprechenden Pixel des DGM gegeneinander aufgetragen, ein Regressionsmodell angepasst sowie die Differenzen aller Paare berechnet (Abb. 6). Zwar ist keine der beiden Variablen von der anderen abhängig, allerdings vermittelt die Darstellungsweise einen guten Eindruck, welcher Datensatz in welchen Höhenbereichen höhere Werte aufweist. Es zeigt sich, dass bis zu einer Höhe von rund 400 m tendenziell die Werte des DGM1000 höher sind und sich dies darüber umkehrt. Mit Ausnahme von zwei extremen Ausreißern betragen die Differenzen maximal 100 Höhenmeter, der Großteil liegt bei unter 40 m. Zudem ist eine Zunahme der Differenzen mit zunehmender Höhe zu beobachten.

Dennoch stimmen die Höhenangaben beider Datensätze insgesamt gut überein, wie das angepasste Regressionsmodell bestätigt. Das Bestimmtheitsmaß ist mit $r^2 = 0.94$ sehr hoch, der y-Achsenabschnitt liegt bei -14,48 mm und die Steigung der Regressionsgeraden von 1,04 ist nur geringfügig zu hoch. Beides bestätigt die Annahme eines etwas zu steilen Verlaufs der Geraden durch Glättung der Daten und Abschwächung von Minima und Maxima im DGM1000. Dies bedeutet konkret, dass die Regressionsmodelle bei Verwendung der Höhen aus dem DGM einen niedrigeren y-Achsenabschnitt in der Größenordnung von etwa 14 mm und eine geringfügig höhere Steigung aufweisen als bei Verwendung der Stationsdaten. Dies konnte durch parallele Verwendung beider Höhendatensätze nachgewiesen werden (Abb. 7), erscheint in Anbetracht der geringen Größenordnung der Abweichungen jedoch vernachlässigbar.

Auf Grund der insgesamt verhältnismaßig guten Übereinstimmung wird die Verwendung des DGM1000 somit durchaus als geeignet eingeschätzt, um die Qualität der reanalysierten RADOLAN-Produkte in Bezug auf die Abbildung der Niederschlagszunahme mit zunehmender Höhe abzuschätzen.

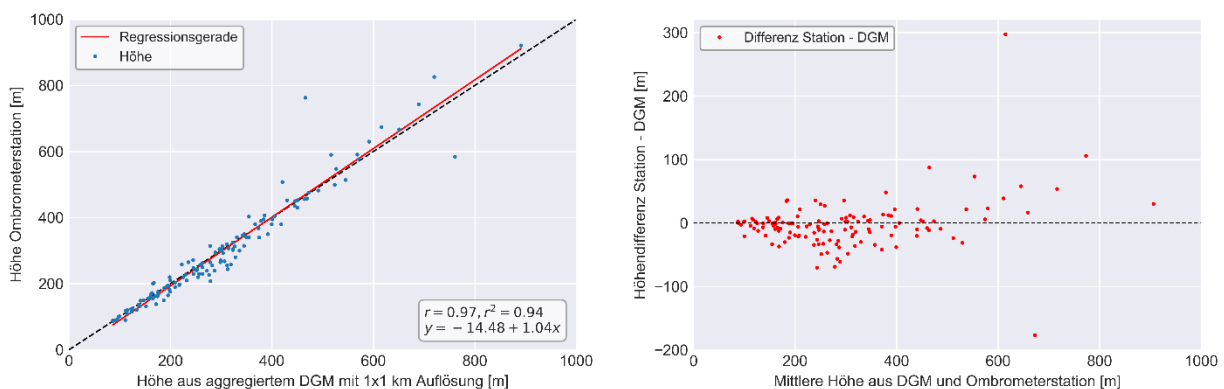


Abb. 6: Vergleich der Übereinstimmung von punktuellen Höheninformationen aus den Metadaten der Niederschlagsstationen und aggregiertem DGM1000

3.2.3 Vergleich der Höhenabhängigkeit zwischen Ombrometern, RW002 und RW003

Die Regressionsmodelle für die Ombrometermessungen (Abb. 7) dienen zugleich als Referenz zur Einordnung der Höhenabhängigkeit des Niederschlags in Hessen für den betrachteten Zeitraum 2001 – 2014. Die Modelle zeigen mit einem Bestimmtheitsmaß von $r^2 = 0,24$ beide keine besonders gute Anpassung und eine große Streuung insbesondere im mittleren Höhenbereich zwischen etwa 400 und 600 m. Die Steigung liegt bei 0,62 bzw. 0,66, d.h. das Modell nimmt eine Zunahme des Jahresniederschlags von 0,66 mm pro Höhenmeter an.

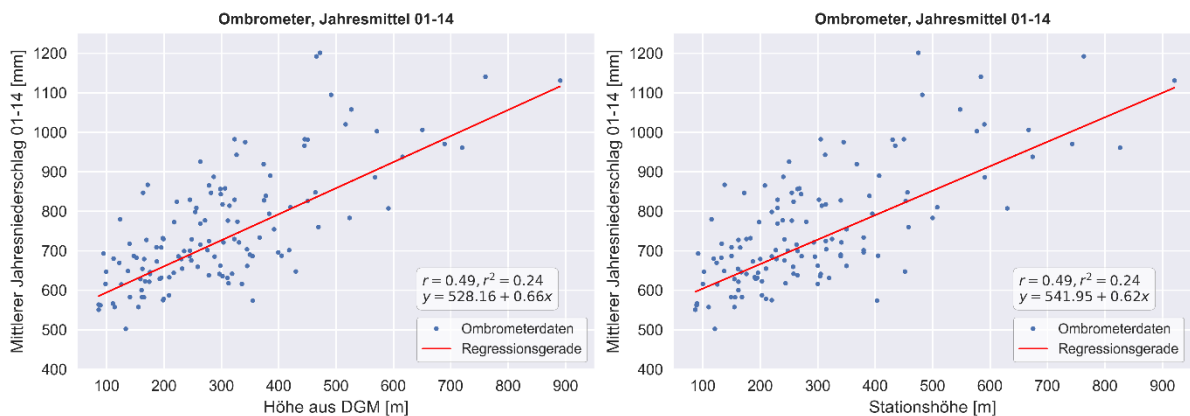


Abb. 7: Vergleich der Regressionsmodelle für Ombrometermessungen und Höhe ü. NN auf Basis unterschiedlicher Höhendaten. Links: Mittlerer Jahresniederschlag 2001-2014 ~ Höhe aus DGM1000, rechts: Mittlerer Jahresniederschlag 2001-2014 ~ Stationshöhe gemäß Metadaten der Ombrometer

Die Regressionsmodelle der Reanalyseläufe auf Basis der Höhen aus dem DGM zeigen mit $r^2 = 0,2$ bzw. $r^2 = 0,19$ eine geringfügig schlechtere Anpassung als das entsprechende Modell für die Ombrometermessungen. Dennoch ist die Anpassung besser als in Bezug zur Stationshöhe, welche bei RADKLIM $r^2 = 0,17$ bzw. $r^2 = 0,19$ beträgt. Die Regressionsgeraden beider RADKLIM-Produkte haben jedoch einen erheblich höheren y-Achsenabschnitt sowie eine deutlich geringere Steigung von nur 0,36 bzw. 0,37. Die Regressionsmodelle prognostizieren im Vergleich zu den Ombrometermessungen folglich höhere Werte der RADKLIM-Daten in den unteren Höhenlagen und eine Umkehr, also höhere Ombrometerwerte, mit zunehmender Höhe.

Im direkten Vergleich der Modelle nimmt die Niederschlagshöhe der Ombrometermessungen um 0,29 mm pro Höhenmeter mehr zu als bei RW002.

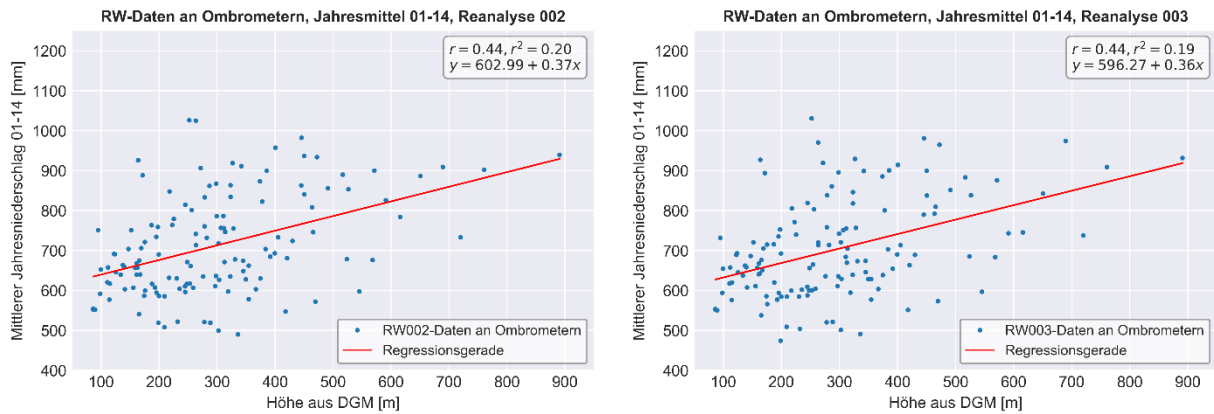


Abb. 8: Vergleich der Höhenabhängigkeit der Niederschlagssummen der RADKLIM-Daten in den 128 Pixeln unmittelbar an den Ombrometerstationen. Links: RW Reanalyse 2017.002, rechts: RW Reanalyse 2017.003

Die statistische Auswertung liefert somit eine Bestätigung des optischen Eindrucks eines Gradienten zwischen dem tiefer gelegenen Bereich der Wetterau und den umliegenden Gebirgszügen (Kap. 3.1.1 und Karte 7) und belegt die in Tab. 5 bereits angedeutete geringere Streuung (Spannweite und Standardabweichung) der RADKLIM-Daten im Vergleich zu den Ombrometerdaten.

Ein Vergleich der Reanalyseläufe untereinander zeigt eine minimal geringere Niederschlagszunahme mit der Höhe sowie insgesamt etwas geringere Niederschlagsmengen bei Reanalyse 2017.003 und bestätigt somit die Ergebnisse aus Kap. 3.1.2.

Nach diesen Auswertungen mit kleiner Stichprobe und Vergleichsdatensatz wurde abschließend eine Analyse aller 23320 RADKLIM-Pixel innerhalb Hessens vorgenommen (Abb. 5).

Die Anpassung der Regressionsmodelle ist bei beiden RADKLIM-Versionen noch deutlich schlechter als bei der kleineren Stichprobe. Der y-Achsenabschnitt ist minimal höher, die Steigung hingegen um 0,4 bzw. 0,5 geringer, der Verlauf der Geraden also flacher.

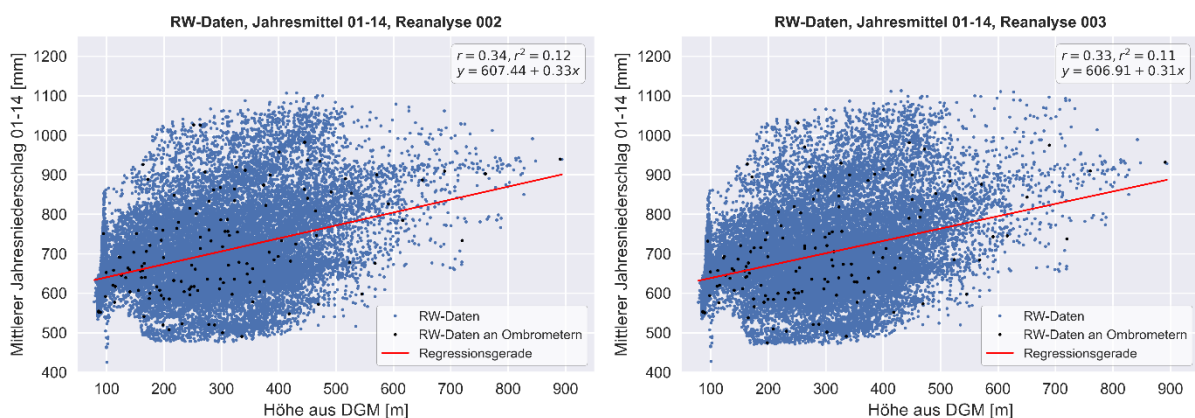


Abb. 9: Vergleich der Höhenabhängigkeit der Niederschlagssummen der RADKLIM-Daten für das Bundesland Hessen. Links: RW Reanalyse 2017.002, rechts: RW Reanalyse 2017.003

Die Niederschlagszunahme mit der Höhe ist bei Betrachtung aller RADKLIM-Pixel somit nur etwa halb so hoch ist wie bei den Ombrometermessungen – allerdings unter der Einschränkung eines extrem unterschiedlichen Stichprobenumfangs und eingeschränkter Vergleichbarkeit der räumlichen

Repräsentativität in Bezug auf die Verteilung der Stationen und des Ortes der Messung (200 cm² am Boden vs. 1 km³ in der Atmosphäre) beider Methoden.

3.2.4 Saisonalität der Höhenabhängigkeit

Wie in Kap. 3.3.1 beschrieben, hat auch die Jahreszeit Einfluss auf die Qualität von Radarniederschlagsprodukten, insbesondere in Gebirgen. Daher wurde die Analyse der Höhenabhängigkeit zusätzlich um den Vergleich zwischen Sommer- und Winterhalbjahr (Mai – Oktober bzw. November - April) erweitert. Es zeigt sich ein deutlicher saisonaler Unterschied der Niederschlagszunahme mit der Höhe in den Ombrometerdaten. Der Verlauf der Regressionsgeraden für das Winterhalbjahr ist erheblich steiler als die des Sommerhalbjahres (Abb. 10). Dies ist aus meteorologischer Sicht vollkommen plausibel. Im Luv von Hängen können sich zusätzlich zu Niederschlägen konvektiven und frontalen Ursprungs, welche im Grunde überall gleichermaßen auftreten können, zusätzlich orographische Niederschläge bilden (HÄCKEL 2008). Somit haben konvektive Ereignisse in niedrigeren Höhenlagen tendenziell einen größeren Anteil an der Gesamtniederschlagsmenge als in Gebirgen. Zusätzlich ist das Potenzial für Konvektion bei höheren Temperaturen größer, was ebenfalls auf niedrigere Höhenlagen zutrifft. Dadurch, dass Anzahl und Intensität konvektiver Gewitterzellen auf Grund der thermischen Gegebenheiten im Sommer höher sind als im Winter, sind somit die höheren Sommerniederschläge in niedrigeren Höhenlagen zu erklären.

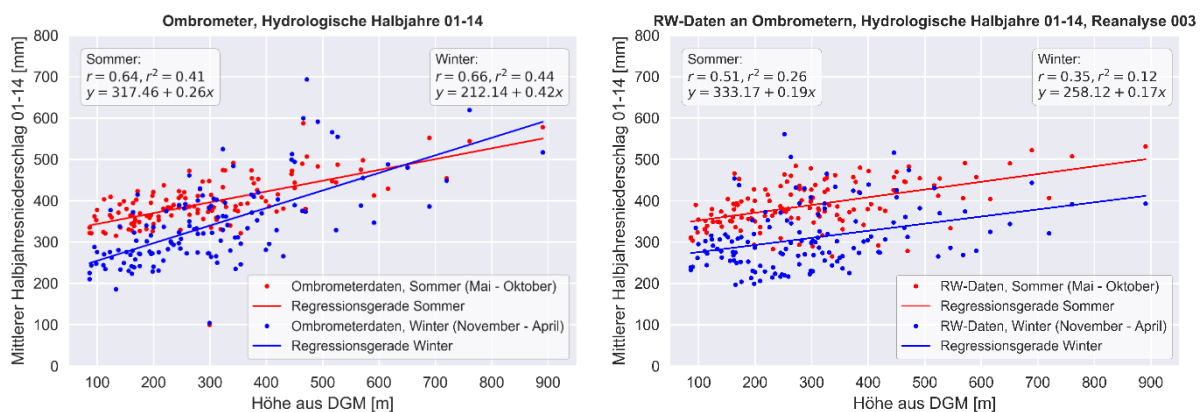


Abb. 10: Regressionsanalyse der Höhenabhängigkeit der Niederschlagssummen im Sommer- und Winterhalbjahr. Links: Ombrometermessungen, rechts: Pixel der Reanalyse 2017.003 an Ombrometern

Die RW003-Daten zeigen für das Sommerhalbjahr einen ähnlichen, nur geringfügig flacheren Verlauf der Regressionsgeraden mit einem um rund 15 mm höheren y-Achsenabschnitt. Im Sommer stimmen beide Datensätze somit gut überein. Im Winterhalbjahr offenbart sich jedoch nach wie vor die Schwäche der Radardaten. Die Gerade verläuft nahezu parallel zu der des Sommerhalbjahres und weist sogar eine minimal geringere Steigung auf. Im Vergleich zu den Ombrometerdaten wird somit ersichtlich, dass die Unterschätzung der Niederschlagszunahme mit der Höhe praktisch ausschließlich auf das Winterhalbjahr zurückzuführen ist. In dieser Zeit ist die Kombination der Effekte des Overshootings und der geringeren Reflektivität fester Hydrometeore offenbar nach wie vor zu groß, um ausreichend korrigiert werden zu können.

Durch die Reanalyse der Radardaten konnten die Messfehler in reliefiertem Gelände und die Unterschätzung orographischer Niederschläge folglich nicht vollständig beseitigt werden. Allerdings zeigt der Vergleich zu den Ergebnissen der Vorstudie bereits eine erhebliche Verbesserung der Datenqualität gegenüber RADOLAN. Der größte Fortschritt in diesem Bereich konnte jedoch mit Einführung des neuen YW-Produktes erreicht werden. Während die besten 5-minütig aufgelösten RADOLAN-Daten, das RY-Produkt, praktisch gar keine Niederschlagszunahme mit der Höhe aufwies (PEUBNER 2013), wurde für das neue, quasi-angeeichte YW-Produkt eine Steigung der Regressionsgeraden von 0,32 bei einem Bestimmtheitsmaß von 0,14 ermittelt. Insgesamt liefern die Regressionsanalysen für das YW002-Produkt sehr ähnliche Ergebnisse wie für RW und werden deshalb nicht im Detail vorgestellt.

Die Eignung der Radarklimatologie im Hinblick auf die Auswertung von Starkniederschlägen ist in Anbetracht dieser Ergebnisse definitiv gegeben, da Starkregen kurzer Dauerstufen primär konvektiven Ursprungs sind und im Sommer auftreten und die Wolken sich auch in höhere Atmosphärenschichten erstrecken. Ein Overshooting ist dort also seltener der Fall als bei orographischen oder auch frontalen Niederschlägen.

3.3 Niederschlagsintensität

Alle zuvor erläuterten Auswertungen bezogen sich auf potenzielle Radarmessfehler, die erst bei Betrachtung längerer Zeitreihen sichtbar werden und die Auswertungen wurden entsprechend anhand aggregierter Niederschlagssummen vorgenommen. Die Analyse von Starkregen im Hinblick auf die Erstellung von Starkregen-Hinweiskarten erfordert jedoch eine Betrachtung einzelner Niederschlagsintervalle oder kurzer Dauerstufen. Aus diesem Grund wurde abschließend eine Analyse aller Einzelintervalle im Vergleich zwischen RADKLIM und Ombrometern im Hinblick auf die Verteilung der Niederschlagsintensitäten durchgeführt.

Dazu wurde zunächst eine Klassifizierung aller Einzelintervalle der Datensätze RW002, RW003 sowie aller Ombrometerdaten vorgenommen. Um eine Vergleichbarkeit zwischen RADKLIM und Ombrometerdaten herzustellen, wurden letztere auf stündliche Summen mit identischen Intervallgrenzen aggregiert.

Anschließend wurden basierend auf der Klassenzugehörigkeit sowohl die Klassenhäufigkeit, also die Anzahl der Intervalle pro Klasse, als auch die Niederschlagssumme pro Klasse berechnet.

Beide Informationen wurden jeweils einmal zeitlich und einmal räumlich aggregiert, sodass für jeden Niederschlagsdatensatz acht Tabellen berechnet wurden, welche als pandas DataFrames in einer HDF5-Datei abgelegt wurden. Ein Teil der Ergebnisse wurde zudem in Geodatenbanken exportiert. Die durchgeführten Berechnungen ermöglichen Aussagen darüber, wo und wann besonders häufig oder selten Niederschläge bestimmter Intensitäten aufgetreten sind.

Das markanteste Ergebnis dieser Analysen liefert ein Vergleich des Verhältnisses der Klassenhäufigkeiten zwischen RADKLIM und Ombrometerdaten. Es wurde zunächst für jeden Datensatz die Anzahl der Intervalle pro Klasse im Zeitraum 2001 – 2014 pro Pixel bzw. Station

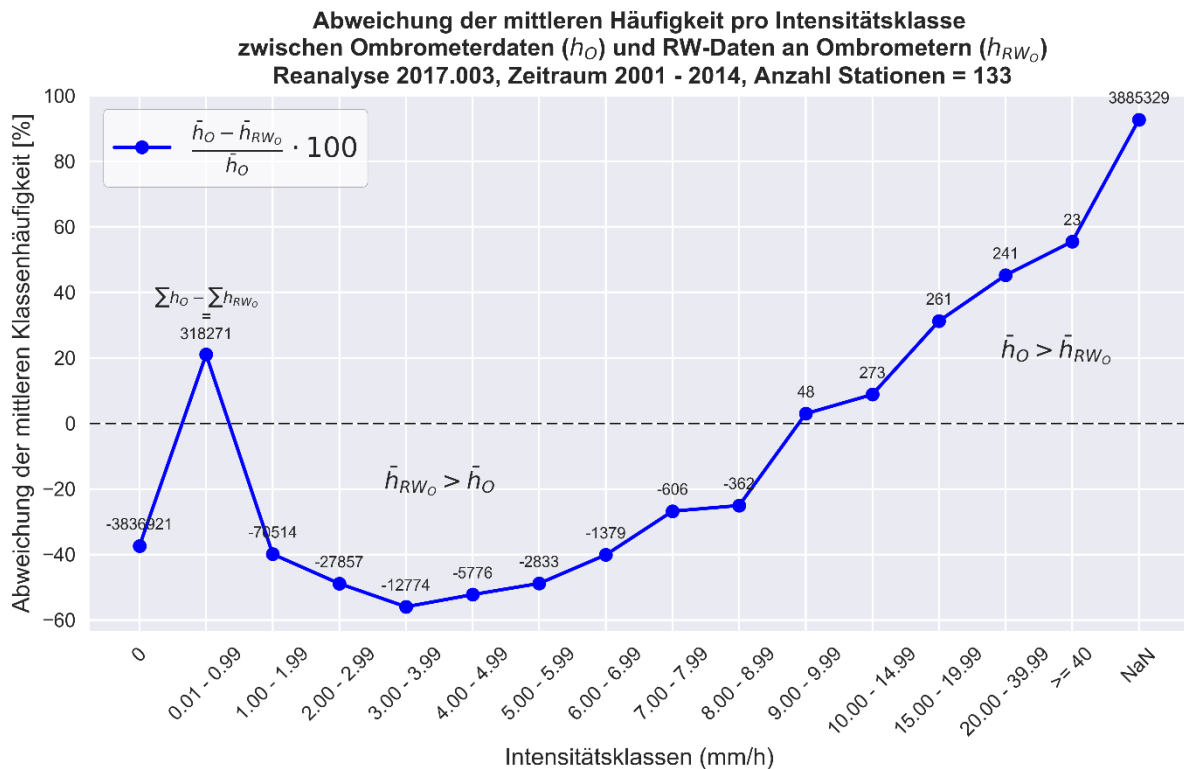


Abb. 11: Vergleich der Klassenhäufigkeit im Zeitraum 2001 - 2014 zwischen RW Reanalyse 2017.003 und Ombrometern

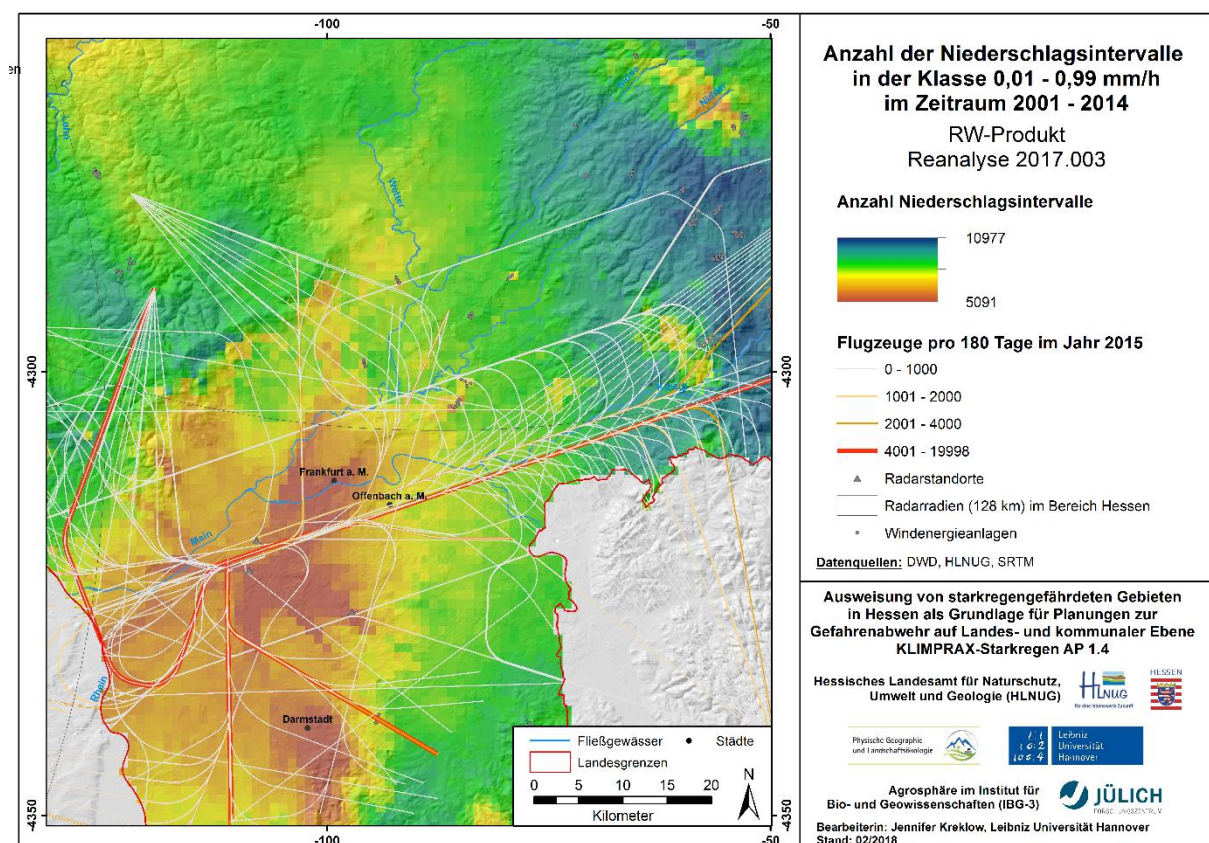
aufsummiert und diese Summen anschließend gemittelt. Abschließend wurde die prozentuale Abweichung zwischen RW- und Ombrometerdaten berechnet (Abb. 11). Zur besseren Einordnung der Prozentangaben wurde zusätzlich die absolute Differenz vor der Mittelwertbildung über alle Pixel zwischen beiden Datensätzen geplottet. Positive Werte bedeuten, dass in den Ombrometerdaten mehr Intervalle auf die jeweilige Klasse entfallen, bei negativen Werten ist die jeweilige Klasse häufiger in den RW-Daten vertreten.

Der Eintrag NaN steht für Not a Number und kennzeichnet Fehlwerte, welche deutlich häufiger in den Ombrometerdaten vorkommen. Fehlzeiten können entweder dadurch entstehen, dass ein Ombrometer ausgefallen ist oder dadurch, dass es zu Beginn der Zeitreihe noch nicht existierte oder vor Ende demontiert wurde. In den RADKLIM-Daten hingegen sind Fehlwerte nur in Ausnahmefällen vorhanden, bspw. im Sommer 2014 während des Ausfalls des Radars Flechtdorf (Kap. 3.1.1) und in den ersten sechs Stunden im Januar 2001 vor Beginn des RADKLIM-Datensatzes. Dadurch lässt sich die große Diskrepanz zwischen den Klassen 0 und NaN erklären.

Darüber hinaus zeigt die Kurve einen markanten Verlauf mit einem positiven Wert in der niedrigsten Klasse 0,01 - 0,99 mm/h, einem acht Klassen umfassenden negativen Bereich zwischen 1,00 und 8,99 mm/h, in dem die Klassenhäufigkeit bei RADKLIM höher ist, und anschließend eine Umkehr in den positiven Bereich mit starker, konstanter Zunahme ab 9 mm/h. Dies bedeutet, dass Niederschläge ab einer Intensität von ca. 9 mm/h häufiger von Ombrometern erfasst werden als vom Radar. Bei RW002 liegt dieser Schwellenwert eine Klasse höher, also bei 10 mm/h. Wenngleich dies auf den ersten Blick überraschend erscheint, ist es bei Betrachtung der unterschiedlichen Messmethoden durchaus nachvollziehbar. Ombrometer messen den gefallenen Niederschlag am Boden auf einer Fläche von

200 cm². Das Radar hingegen misst den Niederschlag innerhalb eines Luftvolumens von rund einem Kubikkilometer in der Höhe. Der ausgegebene Niederschlagswert entspricht somit einem Mittelwert für dieses Luftvolumen, was die Erklärung für eine Abschwächung möglicherweise punktuell auftretender Maxima darstellt. Im unteren und mittleren Intensitätsbereich hingegen ist die Wahrscheinlichkeit, dass irgendwo innerhalb dieses Luftvolumens Niederschlag auftritt, erheblich höher als an einem einzigen Ort.

Dies liefert jedoch keine Erklärung dafür, dass sich in der untersten Klasse bis 0,99 mm/h mehr Ombrometerwerte befinden. Eine mögliche Begründung wäre, dass es durch die Korrekturalgorithmen der Radarmessungen zu einer Unterdrückung geringer Reflektivitäten kommt, beispielsweise wenn an bestimmten Orten regelmäßig Echos von Störobjekten herausgefiltert werden müssen, teilweise aber auch fälschlicherweise Niederschläge als Störechos fehlinterpretiert werden. Dies könnte insbesondere an beweglichen Objekten vorkommen, die das Radarsignal stören, aber nicht vollständig blockieren, und sich immer oder regelmäßig am gleichen Ort befinden, sodass deren Existenz in den Korrekturroutinen berücksichtigt werden kann. Beispiele hierfür sind Flugzeuge oder Windenergieanlagen. Die räumliche Verteilung der Klasse 0,01 - 0,99 mm/h untermauert diese Vermutung (Karte 9). Dort zeigen sich größere Bereiche und mehrere Speichen im Umfeld des Flughafens Frankfurt mit sehr geringen Klassenhäufigkeiten, deren Verlauf sich in Teilen mit den frequentiertesten Flugrouten des Flughafens deckt. Zudem gibt es einige Pixel geringer Klassenhäufigkeit an Windenergieanlagen zwischen Frankfurt und dem Vogelsberg, wohingegen dieser Effekt in allen anderen Bereichen Hessens nicht auftritt. Möglicherweise hängt diese „Überkorrektur“



Karte 9: Anzahl der Niederschlagsintervalle in der Klasse 0,01 - 0,99 mm/h in RW003 im Zeitraum 2001 - 2014

mit der Filterung der Störechos von Flugzeugen um Frankfurt zusammen. Die beiden Gebiete geringer Klassenhäufigkeit am Vogelsberg bzw. Büdinger Wald, welche auch in Karte 7 erkennbar und meteorologisch wenig plausibel sind, befinden sich jeweils in der Achse der Speichen nach Nordosten und könnten ebenfalls damit zusammenhängen. Der Effekt geringer Niederschlagssummen und –häufigkeiten tritt zudem mehr oder weniger kreisförmig im Umfeld zahlreicher Radarstandorte auf. Denkbar wäre folglich auch ein Einfluss der Geometrie des Radarstrahls im unmittelbaren Umfeld der Radarstandorte. Wenn der Strahl dort noch einen vergleichsweise geringen Durchmesser und eine geringe Höhe hat, könnten ggf. Niederschläge „übersehen“ werden.

3.4 Abschließende Bewertung

Die Plausibilitätsprüfung hat gezeigt, dass die Reanalyse des Radardatenarchivs eine erhebliche Verbesserung der Datenqualität im Vergleich zu den RADOLAN-Daten bewirkt hat. Die Niederschlagssummen werden in der neuen Radarklimatologie realistisch abgeschätzt, im Mittel und insbesondere im Winter sind die Summen jedoch etwas geringer als in den Ombrometerdaten. Dies lässt sich durch die Summe der analysierten Unsicherheiten sowie die schwer quantifizierbaren Effekte der Signaldämpfung und Strahlgeometrie erklären. Letztere umfassen beispielsweise die entfernungsabhängige Dämpfung des Radarstrahls sowie die Vergrößerung des erfassten Luftvolumens mit zunehmender Entfernung vom Radar, aber auch die Dämpfung durch Niederschläge oder andere Objekte in der Atmosphäre, bspw. Vogel- oder Insektenschwärme, welche auf Grund ihrer räumlichen und zeitlichen Variabilität schwer zu korrigieren ist. Insbesondere im Winterhalbjahr kommt es durch die Kombination der Effekte des Overshootings und der geringeren Reflektivität fester Hydrometeore noch immer zu einer Unterschätzung orographischer Niederschläge. Zudem sind in den Radardaten weniger Intervalle hoher Niederschlagsintensität zu verzeichnen als in den Ombrometerdaten. Es gibt darüber hinaus noch einige Speichen, allerdings konnte deren Ausprägung und Anzahl deutlich reduziert werden. Die in den RADOLAN-Daten mitunter extremen Clutterpixel an Windenergieanlagen konnten in der Radarklimatologie in Hessen zudem nahezu vollständig beseitigt werden.

Überraschend ist hingegen der Effekt der zusätzlichen Aneichstationen aus dem hessischen Landesmessnetz, welcher vielerorts zu einer Reduktion der Niederschlagssummen in den Mittelgebirgsregionen geführt hat. Dieser Effekt erscheint wenig plausibel und ist auf Grund spärlicher Dokumentation nicht nachvollziehbar. Da die Zeitreihe der Reanalyse 2017.003 zudem um zwei Jahre kürzer ist als die der umfangreich dokumentierten und seit 2018 veröffentlichten Reanalyse 2017.002 und für die Starkregenauswertung jedes zusätzliche Jahr wichtig zur Erhöhung der Belastbarkeit der Ergebnisse ist, wurde in Abstimmung mit der Projektleitung entschieden, alle weiteren Auswertungen im Rahmen des Projektes auf Basis der Reanalyse 2017.002 für den Zeitraum 2001-2016 vorzunehmen.

4 Projektbaustein 3 – Erstellung von Starkregen-Hinweiskarten Teil 1: Analyse der Starkregencharakteristik auf Basis der Radarklimatologie

4.1 Konzept und Format der Karte(n)

Im Unterschied zu Starkregen-Gefahrenkarten sind Starkregen-Hinweiskarten bislang als Fachbegriff nicht definiert worden. Im Projekt KLIMPRAX-Starkregen wurde der Begriff erstmals entwickelt, wobei sich das HLNUG derzeit um eine Verankerung auf LAWA-Ebene bemüht.

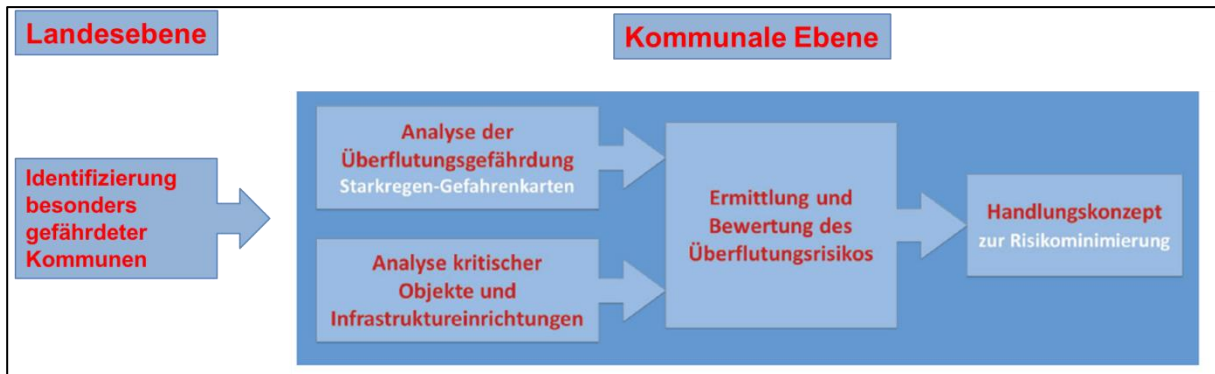


Abb. 12: Planungsebenen bei der Starkregen-Gefahrenabwehr

Ein wirksames Starkregen-Risikomanagement erfolgt auf kommunaler Ebene (Abb. 12), wobei lokale Starkregengefahren aus einer Vielzahl an Ursachen resultieren. Dazu zählen neben der Starkregenintensität und –häufigkeit auch kleinräumige Reliefunterschiede, die sich nur durch digitale Geländemodelle mit Rasterweiten < 1 m erfassen lassen. Weitere kleinräumige Besonderheiten können u.a. Zugangsbereiche zu öffentlichen Einrichtungen sein, die im Starkregenfall überflutet werden. Diese Aspekte sind nur durch detaillierte, großmaßstäbige Starkregen-Gefahrenkarten zu erfassen, die durch spezialisierte Ingenieurbüros erstellt werden können. Die Erstellung der Karten sowie die erforderlichen Geländearbeiten sind zeit- und mittelintensiv. Daher bietet es sich an, innerhalb des Bundeslands Hessen eine Priorisierung der Kommunen mit erhöhten Starkregen-Gefahren vorzunehmen, für die eine Erstellung von Starkregen-Gefahrenkarten vorrangig in Frage kommen. Diese Priorisierung wird durch Starkregen-Hinweiskarten geleistet, die sich auf die Landesebene fokussieren und sich auf Haupteinflüsse der Starkregengefährdung beschränken.

Starkregen-Hinweiskarten in der hier verwendeten Form bestehen als Kartenwerk aus mehreren Einzelkarten. Diese enthalten Informationen

- zur Niederschlagscharakteristik, d.h. Auswertungen der RADKLIM-Daten
- zum Starkregenhinweis-Index, der die Niederschlagscharakteristik mit den Ergebnissen einer Reliefanalyse des urbanen Raums verknüpft sowie
- zum Vulnerabilitäts-Index, der die Starkregenhinweise im urbanen Raum mit dem Auftreten sensibler Nutzungen verbindet.

Die im Projekt KLIMPRAX-Starkregen entwickelten Starkregen-Hinweiskarten besitzen eine räumliche Auflösung von 1 km * 1 km. Sie werden vorrangig digital bereitgestellt, wobei die Anwender (kommunale Entscheidungsträger, interessierte Bürger) die verschiedenen Informationsebenen wählen können. Dies ist durch als pdf exportierte Karten aus ArcGIS realisierbar.

Zusammenfassend bieten Starkregen-Hinweiskarten im Projekt KLIMPRAX eine landesweite Übersicht über Gebiete Hessens mit erhöhtem Auftreten von Starkregen in urbanen Räumen im Zeitraum 2001-2016 und gleichzeitig reliefbedingter Überflutungsgefahr. Dargestellt sind Überflutungspotenziale, unabhängig von einer konkreten Belastung durch Starkregen. Starkregen-Hinweiskarten und Vulnerabilitätskarten erlauben eine Priorisierung der von Starkregen potenziell stärker betroffenen Regionen in Hessen und damit eine zielgerichtete Planung von räumlich höher aufgelösten Detailstudien. Die Karten leisten keine direkten Rückschlüsse auf Gefahren durch kritische Überflutungshöhen oder Bedarf an Hilfeleistung.

In Kapitel 4 wird die Niederschlagscharakteristik anhand der RADKLIM-Daten untersucht. Darauf aufbauend werden räumliche Schwerpunkte von Starkregen in Hessen abgeleitet. Diese Informationen gehen in die Starkregen-Hinweiskarte ein und werden hier als „Teil 1“ bezeichnet. „Teil 2“ bilden Auswertungen von Relief, Landnutzung und Abflussgeschehen und sind Gegenstand von Kapitel 5.

4.2 Analyse der Starkregencharakteristik

4.2.1 Definition der Starkregenklassen

Beim KLIMPRAX-Workshop im Januar 2018 wurde ausgiebig über die Anforderungen und mögliche Methodik der Starkregenanalyse diskutiert. Die Auswertung der Starkregen soll die unterschiedliche „Schwere“ verschiedener Ereignisse abbilden und Aussagen zu den jeweils erwartbaren Folgen ermöglichen. Zudem soll durch die Verwendung von Regenhöhen unterschiedlicher Dauerstufen und Wiederkehrintervallen eine methodische Nähe zu Anwendungen in der Hydrologie gegeben sein. Konsens war die Verwendung mehrerer fachlich begründbarer und räumlich einheitlicher Schwellenwerte gemäß KOSTRA-Mittelwert Hessens für unterschiedliche Dauerstufen und darauf basierend die Berechnung von Überschreitungshäufigkeiten. Dieser Ansatz wurde grundsätzlich verfolgt und erweitert. Um tatsächlich eine Aussage zu den Auswirkungen von Starkregen treffen zu können scheint die Verwendung einfacher Überschreitungshäufigkeiten jedoch nicht geeignet und es wurde stattdessen eine Klassifizierung von Starkregen angestrebt, um die Mehrfachzählung besonders intensiver Ereignisse auszuschließen und unterschiedliche Arten von Ereignissen besser gegeneinander abgrenzen zu können.

Tabelle 6 zeigt die entwickelte Starkregenklassifizierung einschließlich Bedeutung und Schwellenwerten der Klassen. Die Bedeutung der Klassen beschreibt dabei die theoretischen Auswirkungen gemäß der Vorgaben zur Kanalnetzdimensionierung und berücksichtigt keine sekundären Effekte resultierend aus Relief, Landnutzung, Versiegelungsgrad etc.. Diesen Effekten wurde im Projektbaustein 4 durch die GIS-Analysen Rechnung getragen.

Die verwendeten Klassen bewegen sich im Vergleich zu anderen Studien in einem eher moderaten Starkregenbereich. In einer Studie des LUBW wurden beispielsweise Schwellenwerte von $T_n = 30$ und $T_n = 100$ Jahren sowie Extremereignisse über 128 mm in einer Stunde angesetzt. Vor dem Hintergrund der Thematik „Starkregen-Gefahr“ wäre eine Betrachtung von Regenereignissen oberhalb der Bemessungsvorgaben sinnvoll, allerdings stellt dafür die vergleichsweise kurze Zeitreihe der RADKLIM-Daten ein Ausschlusskriterium dar. Bei Betrachtung derart seltener Wiederkehrzeiten würden nur sehr wenige oder möglicherweise gar keine Ereignisse im 16-jährigen Untersuchungszeitraum gefunden werden, wodurch die ermittelte räumliche Verteilung praktisch ein reines Zufallsprodukt wäre.

Die drei Klassen wurden jeweils einmal für die Dauerstufen $D = 15$ Minuten und $D = 60$ Minuten berechnet, welche primär auf die Überflutungs- und Sturzflutgefahr in urbanen Räumen bezogen sind. Von der Betrachtung von Starkregen längerer Dauerstufen als potenzieller Auslöser für Erdrutsche oder Hochwasser wurde in Absprache mit der Projektleitung abgesehen.

Tab. 6: Übersicht der Starkregenklassifikation als Grundlage der Starkregen-Hinweiskarten

Starkregenklasse	Parameter	Begründung	Schwellenwert	Quelle
Häufiges Ereignis („Belastungsbereich Bemessungsregen“)	Überschreitungshäufigkeit Tn 2 a bis < 10 a Dauerstufen: 15 und 60 min (Tn = statistische Wiederkehrzeit)	Empfohlene Überstauhäufigkeit in ländlichen Gebieten (Maximalwasserstand überschreitet Geländeoberkante bzw. Rückstauenebene) Bemessungsregen Siedlungsentwässerung in Wohngebieten (überstaufreier Betrieb in allen urbanen Kanalnetzen)	KOSTRA-Mittelwert Hessen: 12,75 mm / 15 min 20,95 mm / 60 min	DWA-A 118 (2006) DWA-M 119 (2016) DIN EN 752 (2008) Schmitt 2015
Seltenes Ereignis	Überschreitungshäufigkeit Tn 10 a bis < 30 a Dauerstufen: 15 und 60 min	Überflutungshäufigkeit in ländlichen Gebieten (Schädigungen bzw. Funktionsstörungen, die entweder durch Wasseraustritt oder nicht möglichen Wassereintritt in das Entwässerungssystem infolge Überlastung auftreten) Bemessungsregen für Unterführungen und unterirdische Verkehrsanlagen	KOSTRA-Mittelwert Hessen: 19,33 mm / 15 min 33,05 mm / 60 min	DWA-A 118 (2006) DWA-M 119 (2016) DIN EN 752 (2008) Schmitt 2015
Außergewöhnliches Ereignis	Überschreitungshäufigkeit Tn >= 30 a Dauerstufen: 15 und 60 min	Überflutungshäufigkeit in Stadtzentren sowie Industrie- und Gewerbegebieten	KOSTRA-Mittelwert Hessen: 23,82 mm / 15 min 41,30 mm / 60 min	DWA-A 118 (2006) DWA-M 119 (2016) DIN EN 752 (2008) Schmitt 2015

4.2.2 Methodik

Das Zielprodukt der Starkregenauswertung sind insgesamt sechs Rasterdatensätze, die jeweils die Anzahl der häufigen, seltenen und außergewöhnlichen Starkregenereignisse für die Dauerstufen $D = 15$ Minuten und $D = 60$ Minuten ausweisen.

Dabei stellt sich zunächst die Frage, was genau unter dem Begriff „Ereignis“ zu verstehen ist. WINTERRATH et al. (2017, S. 37) haben die Problematik der Begriffsdefinition sehr anschaulich beschrieben:

„Um Fragen nach der Anzahl an Starkregenereignissen oder Trends im Auftreten von Starkregenereignissen adressieren zu können, muss eine Definition des Begriffs „Ereignis“ erfolgen. Die Problematik lässt sich durch folgende Beispiele verdeutlichen: Betrachtet man ein konvektives Wettersystem, das aus mehreren einzelnen konvektiven Zellen besteht, als ein Ereignis oder aber jede Zelle für sich? Handelt es sich bei einer Konvektionszelle um ein Ereignis an verschiedenen Orten (Lagrangescher Ansatz) oder betrachtet man ortsfeste Ereignisse (Euler-Ansatz)? Der Ereignisbegriff ist in der Meteorologie nicht eindeutig definiert. Weitet man die Betrachtungen z. B. auf die Einsatzstatistiken im Katastrophenschutz aus, so wird die Komplexität der Fragestellung weiter erhöht.“

Der Definition des DWA-Arbeitsblattes 531 (DWA 2012) folgend werden in diesem Projekt ortsfeste Niederschlagszeitreihen betrachtet, d. h. jede Rasterzelle wird separat und unabhängig von ihrer Umgebung analysiert. Darüber hinaus ist die Unabhängigkeit aufeinander folgender gezählter Ereignisse zu gewährleisten, was üblicherweise durch eine Pause zwischen Zählungen erreicht wird. Auf diesen Aspekt wird im weiteren Verlauf dieses Kapitels noch genauer eingegangen.

Die Methodik zur Ableitung der Niederschlagsstatistik untergliedert sich in vier Teilschritte, die im Folgenden erläutert werden:

1. Berechnung der Niederschlagshöhen je Dauerstufe basierend auf dem YW002-Produkt
2. Klassifikation aller Intervalle
3. Selektion der zu zählenden Ereignisse
4. Postprocessing: Zählung, Aufbereitung und Export der Ergebnisse

Berechnung der Dauerstufen

Zur Berechnung der Niederschlagshöhe einer Dauerstufe wurde ein gleitendes Fenster entsprechend der Dauerstufe erzeugt und für jedes Intervall die Niederschlagssumme berechnet (Abb. 13). Da die mit *radproc* prozessierten Eingangsdaten als monatliche DataFrames vorliegen, wurde zudem jeweils ein Übertrag der letzten Intervalle aus dem Vormonat in den Folgemonat durchgeführt, sodass eine kontinuierliche Zeitreihe ausgegeben wird. Die ausgegebenen DataFrames haben die gleiche Frequenz wie die Eingangsdaten, also 5 Minuten, enthalten aber jeweils die Niederschlagssumme der letzten 15 bzw. 60 Minuten. Die Beschriftung der Ausgabedaten ist im Gegensatz zu YW rechts, d. h. das Intervall mit der Beschriftung 10:15 Uhr enthält die Niederschlagssumme von 10:00 bis 10:14:59 Uhr. Die zur Dauerstufenberechnung entwickelte Funktion *duration_sum* ist seit Version 0.1.3 in *radproc* integriert. Das Ergebnis der Funktion ist eine HDF5-Datei im gleichen Format wie die Eingangsdaten, d. h. die berechneten Dauerstufen liegen ebenfalls als monatliche DataFrames vor und können somit als Input für alle *radproc*-Funktion genutzt werden.

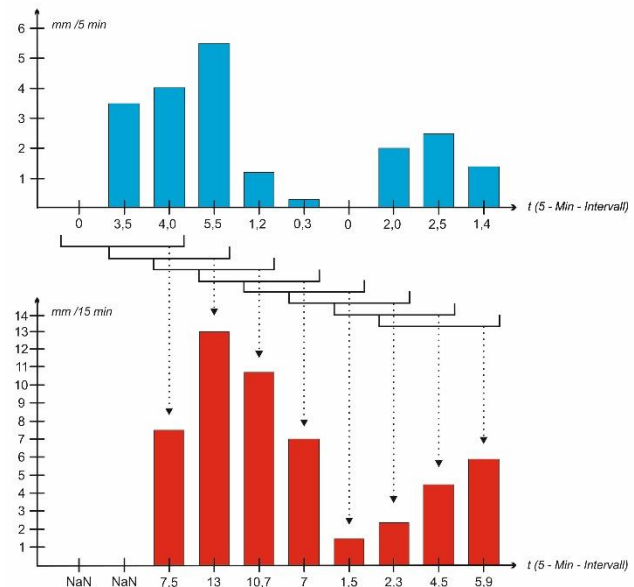


Abb. 13: Berechnung von Niederschlagshöhen der Dauerstufe D = 15 Minuten

Klassifikation aller Intervalle

Die Schwellenwerte zur Klassifikation der Intervalle entsprechen dem Mittelwert des KOSTRA 2010R-Datensatzes aus dem Climate Data Center (DWD 2017), welcher auf das Bundesland Hessen zugeschnitten wurde.

Gemäß der in Kap. 4.2.1 vorgestellten Kriterien wurden die Niederschlagswerte aller Intervalle aller Rasterzellen unabhängig von räumlich oder zeitlich benachbarten Werten durch die Nummer der Klasse ersetzt, auf die sie entfallen.

- 0: kein Starkregen ($T_n < 2$ a)
- 1: häufiger Starkregen ($2 \text{ a} \leq T_n < 10$ a)
- 2: seltener Starkregen ($10 \text{ a} \leq T_n < 30$ a)
- 3: außergewöhnlicher Starkregen (≥ 30 a)

Die Klassifikation und die anschließende Selektion der Ereignisse erfolgen in einem kombinierten Rechenschritt ohne Speicherung der Zwischenergebnisse.

Selektion der zu zählenden Ereignisse

Den komplexesten Schritt stellt die Selektion der Ereignisse dar, die tatsächlich gezählt werden sollen. Eine einfache Zählung, welche Klasse wie oft auftritt, ist auf Grund der Verwendung von Dauerstufen nicht zulässig. Bei Betrachtung von $D = 15$ Min. geht jedes 5-Minuten-Intervall aus den Ursprungsdaten in drei aufeinanderfolgende Intervalle des Dauerstufendatensatzes ein, bei $D = 60$ Min. geht jedes Intervall entsprechend in 12 Summenintervalle ein. Um eine Mehrfachzählung besonders niederschlagsintensiver Intervalle auszuschließen und eine statistische Unabhängigkeit zu gewährleisten, ist also mindestens eine Pause entsprechend der Dauerstufe nach jedem selektierten Starkregenintervall zu berücksichtigen. Allerdings muss sichergestellt werden, dass auch stets die höchste auftretende Klasse eines Ereignisses selektiert wird und nicht einfach diejenige, die zuerst auftritt.

Zusätzlich zur Frage der statistischen Unabhängigkeit stellt sich die der meteorologischen Unabhängigkeit, welche ungleich schwieriger zu definieren ist. Es gibt verschiedene Ansätze, um Niederschlagsereignisse voneinander abzugrenzen. Beispielsweise wird bei der Berechnung des R-Faktors eine niederschlagsfreie Pause von sechs Stunden angesetzt, um zwei erosive Ereignisse zu trennen. Im DWA-Arbeitsblatt 531 (DWA 2012) wird von einer Unabhängigkeit ausgegangen, wenn zwei Ereignisse kurzer, maximal vierstündiger Dauerstufen von einer vierstündigen niederschlagsfreien Phase unterbrochen werden. Bei Dauerstufen über vier Stunden wird eine niederschlagsfreie Pause entsprechend der Dauerstufe angesetzt.

In Anlehnung an diese Definition wurde zunächst vorgeschlagen, Ereignisse abzugrenzen, welche durch eine niederschlagsfreie Pause entsprechend der Dauerstufe oder in Anbetracht der kurzen Dauerstufen ggf. der doppelten Dauerstufe getrennt werden, und dann die höchste Klasse jedes Ereignisses zu selektieren. In Folge intensiver Diskussionen und einer Abwägung unterschiedlicher Ansätze wurde gemeinsam mit dem HLNUG jedoch ein Ansatz ohne Berücksichtigung einer meteorologischen Unabhängigkeit in Form einer Niederschlagspause gewählt. Stattdessen sollte eine höhere Gewichtung langer Ereignisse erfolgen, indem ein sehr langes Ereignis mehrfach gezählt werden kann – ggf. auch in unterschiedlichen Klassen. Dadurch soll neben der Intensität des Ereignisses, welche sich über die Klasse und Dauerstufe definiert, auch die tatsächliche Dauer als Einflussfaktor auf das Schadenspotenzial eines Starkregens in der Statistik berücksichtigt werden.

Zusammenfassend lassen sich somit die folgenden Bedingungen für die Selektion der zu zählenden Ereignisse ableiten:

- Erfassung der höchsten Klasse pro Ereignis
- Lange Niederschlagsereignisse sollen mehrfach selektiert werden
- Kein einzelnes 5-Min-Intervall darf in der gleichen Dauerstufe mehrfach gezählt werden, daher muss eine Pause entsprechend der Dauerstufe zwischen zwei selektierten Intervallen eingehalten werden. Diese Pause muss nicht niederschlagsfrei sein

Die Berücksichtigung dieser Bedingungen erforderte die Entwicklung eines individuellen, effizienten Selektionsalgorithmus, welcher zudem mit einigermaßen überschaubarem Rechenaufwand auf alle Rasterzellen übertragbar sein muss. Abbildung 14 zeigt den schematischen Ablauf des entwickelten Algorithmus für die Niederschlagszeitreihe einer Rasterzelle.

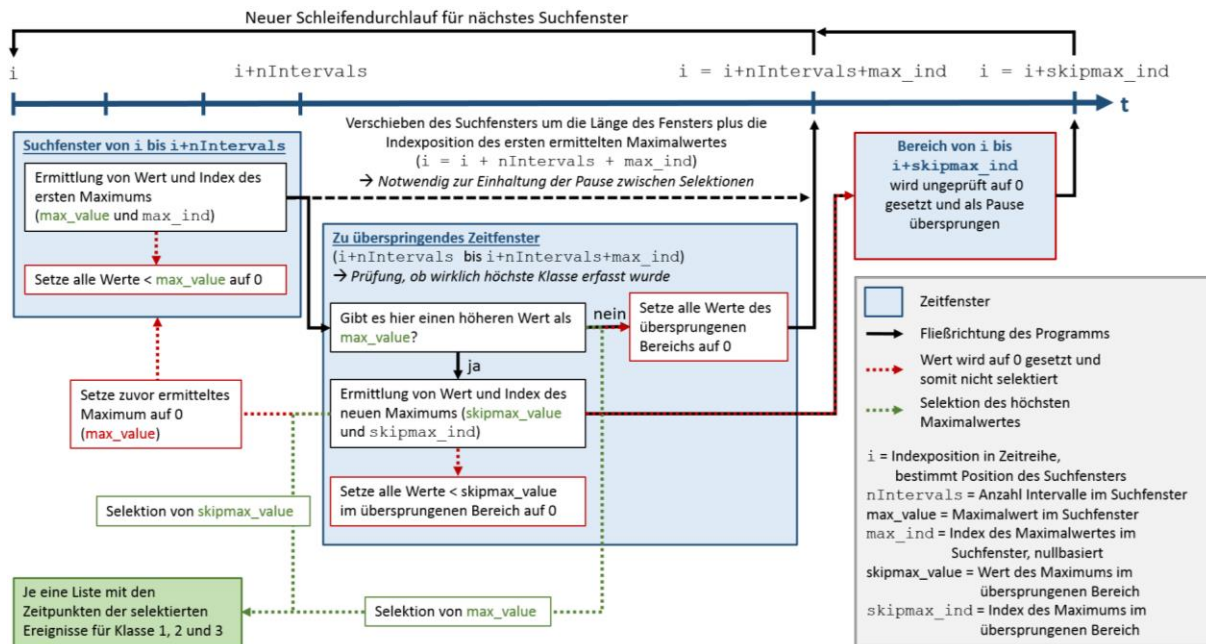


Abb. 14: Schematische Darstellung des Algorithmus zur Selektion der zu zählenden Starkregenereignisse

Am Beispiel der Dauerstufe $D = 15$ Minuten wird der Ablauf im Folgenden erläutert.

Es wird zu Beginn eines Monats ($i = 0$) ein Suchfenster entsprechend der Dauerstufe erzeugt, also ein Fenster der Länge 15 Minuten bzw. 3 Intervalle ($nIntervals = 3$). In Python wird nullbasiert indiziert und es werden nun die ersten drei Intervalle von Indexposition 0 bis vor 3 ausgewählt. Innerhalb dieses Fensters werden der erste Maximalwert (max_value , Klasse 0, 1, 2 oder 3) sowie dessen Position (max_ind , Wertebereich 0-2) ermittelt. Alle anderen Werte innerhalb des Suchfensters werden auf 0 gesetzt, was bedeutet, dass sie am Ende nicht selektiert werden.

Theoretisch müsste nun ein Zeitfenster von zwei Intervallen nach dem Zeitpunkt des ersten ermittelten Maximums übersprungen werden und das nächste Suchfenster danach geprüft werden. Allerdings kann es sein, dass in dem zu überspringenden Zeitfenster noch ein höheres Maximum (eine höhere Starkregenklasse) als max_value aufgetreten ist. Aus diesem Grund wird in diesem Bereich geprüft, ob ein höherer Wert als max_value vorhanden ist.

Wenn dies nicht der Fall ist, werden alle Werte im zu überspringenden Bereich auf 0 gesetzt, i wird um $nIntervals + max_ind$ erhöht und anschließend in einem neuen Schleifendurchlauf ein neues Suchfenster von i bis $i + nIntervals$ erzeugt.

Wenn jedoch ein höheres Maximum auftritt ($skipmax_value$), werden alle anderen Werte im geprüften Bereich einschließlich des ersten Maximums max_value des Suchfensters auf 0 gesetzt. Anschließend wird ein Zeitfenster von zwei Intervallen nach dem Zeitpunkt des zweiten, höheren Maximalwertes $skipmax_value$ ($skipmax_ind$) ungeprüft übersprungen, indem alle Werte darin auf 0 gesetzt werden. i wird schließlich um $nIntervals + max_ind + skipmax_ind$ erhöht und anschließend wird in einem neuen Schleifendurchlauf ein neues Suchfenster von i bis $i + nIntervals$ erzeugt.

Fallstudien mehrerer Starkregenereignisse für einzelne Rasterzellen haben gezeigt, dass bei Verwendung der vier Klassenwerte von 0 bis 3 keine weitere Überprüfung des zweiten übersprungenen Bereichs mehr notwendig ist. In sehr seltenen Ausnahmefällen und bei Betrachtung der tatsächlichen Niederschlagshöhen kann es zum Überspringen höherer Maxima kommen, allerdings würde eine fortwährende Prüfung aller Bereiche wiederum die Bedingung einer Mehrfachberücksichtigung langer Ereignisse in Frage stellen. Hier wurde somit dem folgenden Ansatz Vorrang eingeräumt: Je früher ein Intervall in einem Ereignis selektiert wird, desto eher kann anschließend nach entsprechender Pause das nächste selektiert werden.

Haben beide „Maxima“ der untersuchten Zeitfenster den Wert 0, tritt also kein Starkregen auf, hat die Variable `max_ind` den Wert 0 und das nächste Suchfenster schließt unmittelbar an das vorherige an.

Index	Date (UTC)	YW	D15	classes_D15	select_cl_D15
0	2008-05-30 17:15:00+00:00	0.00	0.01	0	0
1	2008-05-30 17:20:00+00:00	0.00	0.01	0	0
2	2008-05-30 17:25:00+00:00	0.00	0.00	0	0
3	2008-05-30 17:30:00+00:00	0.00	0.00	0	0
4	2008-05-30 17:35:00+00:00	0.00	0.00	0	0
5	2008-05-30 17:40:00+00:00	0.00	0.00	0	0
6	2008-05-30 17:45:00+00:00	0.00	0.00	0	0
7	2008-05-30 17:50:00+00:00	0.00	0.00	0	0
8	2008-05-30 17:55:00+00:00	0.16	0.16	0	0
9	2008-05-30 18:00:00+00:00	0.55	0.71	0	0
10	2008-05-30 18:05:00+00:00	3.78	4.49	0	0
11	2008-05-30 18:10:00+00:00	14.19	18.52	1	0
12	2008-05-30 18:15:00+00:00	5.84	23.81	2	0
13	2008-05-30 18:20:00+00:00	6.28	26.31	3	3
14	2008-05-30 18:25:00+00:00	1.33	13.45	1	0
15	2008-05-30 18:30:00+00:00	0.33	7.94	0	0
16	2008-05-30 18:35:00+00:00	0.00	1.66	0	0
17	2008-05-30 18:40:00+00:00	0.00	0.33	0	0
18	2008-05-30 18:45:00+00:00	0.00	0.00	0	0

`nIntervals = 3`
`max_value = 1`
`max_ind = 2`

Zu überspringendes Zeitfenster:
`i=9+3=12 bis vor i=12+2=14`

`skipmax_value = 3`
`skipmax_ind = 1`

ungeprüft übersprungen:
`i=12+2=14 bis vor`
`i=14+1+1=16`

Abb. 15: Fallbeispiel für die Funktionsweise des Selektionsalgorithmus

Abbildung 15 zeigt die Funktionsweise des Algorithmus am Beispiel eines Niederschlagsereignisses bei Altenstadt vom 30.05.2008 für die Dauerstufe $D = 15$ Minuten. Jeder blaue Balken repräsentiert ein Suchfenster. Am Ende des vierten Suchfensters an Indexposition 11 wird das erste Maximum mit dem Wert `max_value = 1` angetroffen. Um sicherzustellen, dass kein höheres Maximum übersprungen wird, werden die beiden folgenden Intervalle dennoch auf ihr Maximum überprüft, welches tatsächlich höher ist und der Variable `skipmax_value` zugewiesen wird. Es werden alle anderen Werte einschließlich `max_value`, die kleiner sind als `skipmax_value` auf 0 gesetzt, also nicht selektiert. Im

Anschluss an das selektierte Maximum `skipmax_value` werden wiederum die zwei folgenden, nicht unabhängigen Intervalle übersprungen und das nächste Suchfenster beginnt ab 18:35. Es ist in beiden Fällen ausreichend, zwei Intervalle nach dem jeweiligen Maximum zu überspringen, denn das erste YW-Intervall (6,28 mm) des selektierten D15-Intervalls `skipmax_value` (18:20) geht in die Summenintervalle um 18:20, 18:25 und 18:30 ein. Folglich dürfen die beiden D15-Intervalle um 18:25 und 18:30 nicht selektiert werden, weil mindestens eines der in deren Summenbildung einfließenden YW-Intervalle doppelt gezählt werden würde. Die Ereignisse wären somit statistisch nicht unabhängig. Es ist an dieser Stelle anzumerken, dass die Beschriftung der YW-Daten des DWD standardmäßig links und die Beschriftung von Summenprodukten wie RW rechts ist. Um Berechnung und Vergleich der Daten zu vereinfachen, wurde die Beschriftung der YW-Daten für dieses Beispiel nach rechts verschoben, die Beschriftung der Dauerstufenintervalle ist grundsätzlich rechts. Somit enthält das selektierte Starkregenereignis die Niederschlagssumme von 18:05:01 bis 18:20:00. Nach Einhaltung der Pause beschreibt das folgende Suchfenster den Zeitraum von 18:30:01 bis 18:45:00.

Dieser Algorithmus läuft für alle Rasterzellen jeweils unabhängig und asynchron ab, d. h. die Suchfenster und übersprungenen Zeitfenster sind je nach Niederschlagsverlauf unterschiedlich. Dies führt dazu, dass beim Übergang zum nächsten Monat im Gegensatz zur Dauerstufenberechnung kein konstantes Zeitfenster an den Folgemonat übergeben werden kann. Vor dem Hintergrund der Notwendigkeit einer effizienten, vektorisierten Programmierung anstelle einer extrem ineffizienten Schleife über alle Rasterzellen konnte keine Ausgabe der Indexposition i am Ende eines Monats erreicht werden. Folglich arbeitet der Selektionsalgorithmus nicht monatsübergreifend, sondern beginnt in jedem Monat in allen Rasterzellen gleichermaßen bei $i = 0$. Dies führt dazu, dass die letzten maximal 6 ($D = 15$) bzw. 24 ($D = 60$) Intervalle eines Monats möglicherweise nicht korrekt ausgewertet werden. Dieser Tradeoff zugunsten einer signifikanten Erhöhung der Rechengeschwindigkeit war in Anbetracht des sehr großen Datensatzes jedoch unausweichlich. Zudem liegt der Einfluss dieser Unsicherheit mit maximal 0,07% bzw. 0,27% möglicherweise fehlerhaft selektierter Intervalle weit unter der Messungsgenauigkeit von Radar- und Ombrometermessungen und wird somit als vernachlässigbar angesehen.

Am Ende einer Monatszeitreihe liegt ein DataFrame vor, in dem nur noch die Maxima jedes Ereignisses unter Berücksichtigung der Anforderungen bezüglich statistischer Unabhängigkeit und Mehrfachberücksichtigung langer Ereignisse Werte größer 0 aufweisen. Aus diesem DataFrame werden für jede Rasterzelle alle Zeitpunkte extrahiert, an denen Starkregen der jeweiligen Klasse selektiert wurden. Diese Zeitpunkte werden abschließend in je einem Python-Dictionary pro Starkregenklasse abgespeichert.

Dieser Ablauf wird für alle Monate des 16 Jahre umfassenden Zeitraums von 2001 bis 2016 wiederholt.

Postprocessing

Nach Abschluss der Selektion wurden die drei Dictionaries mit den Zeitangaben aller selektierten Starkregen jeder Klasse in DataFrames konvertiert und jeweils die Anzahl der Zeitpunkte pro Rasterzelle gezählt. Diese Anzahl der Starkregen pro Klasse und Rasterzelle stellt das Endergebnis der Auswertung dar, welches in Rasterdatensätze exportiert wurde. Darüber hinaus wurden die DataFrames mit allen Zeitangaben in HDF5 abgespeichert und als Excel-Tabellen exportiert. Zusätzlich wurde das ID-Raster Hessens mit der Lage der RADKLIM-Rasterzellen in ein Shapefile konvertiert und die Spalten der DataFrames mittels einer modifizierten join-Funktion aus *radproc* in die Attributtabelle exportiert.

4.2.3 Ergebnisse

Eine Übersicht der sechs erzeugten Rasterdatensätze ist in Karte 10 dargestellt. Für die Dauerstufe $D = 15$ Min wurden in der Klasse 1 (häufig) zwischen 0 und 14 Ereignisse selektiert, in Klasse 2 0-6 und in Klasse 3 0-5 Ereignisse. Für $D = 60$ Min ist die Verteilung mit 0-23, 0-6 und 0-4 ähnlich und zeigt ebenfalls eine deutliche Abnahme der Starkregen ab einem Wiederkehrintervall von 10 Jahren.

Dies ist ein Beleg dafür, dass die vergleichsweise defensive Wahl der Starkregen-Schwellenwerte auf Grund der relativ kurzen RADKLIM-Zeitreihe notwendig war, um überhaupt Ergebnisse jenseits vereinzelter Pixel in den höheren Klassen zu erhalten.

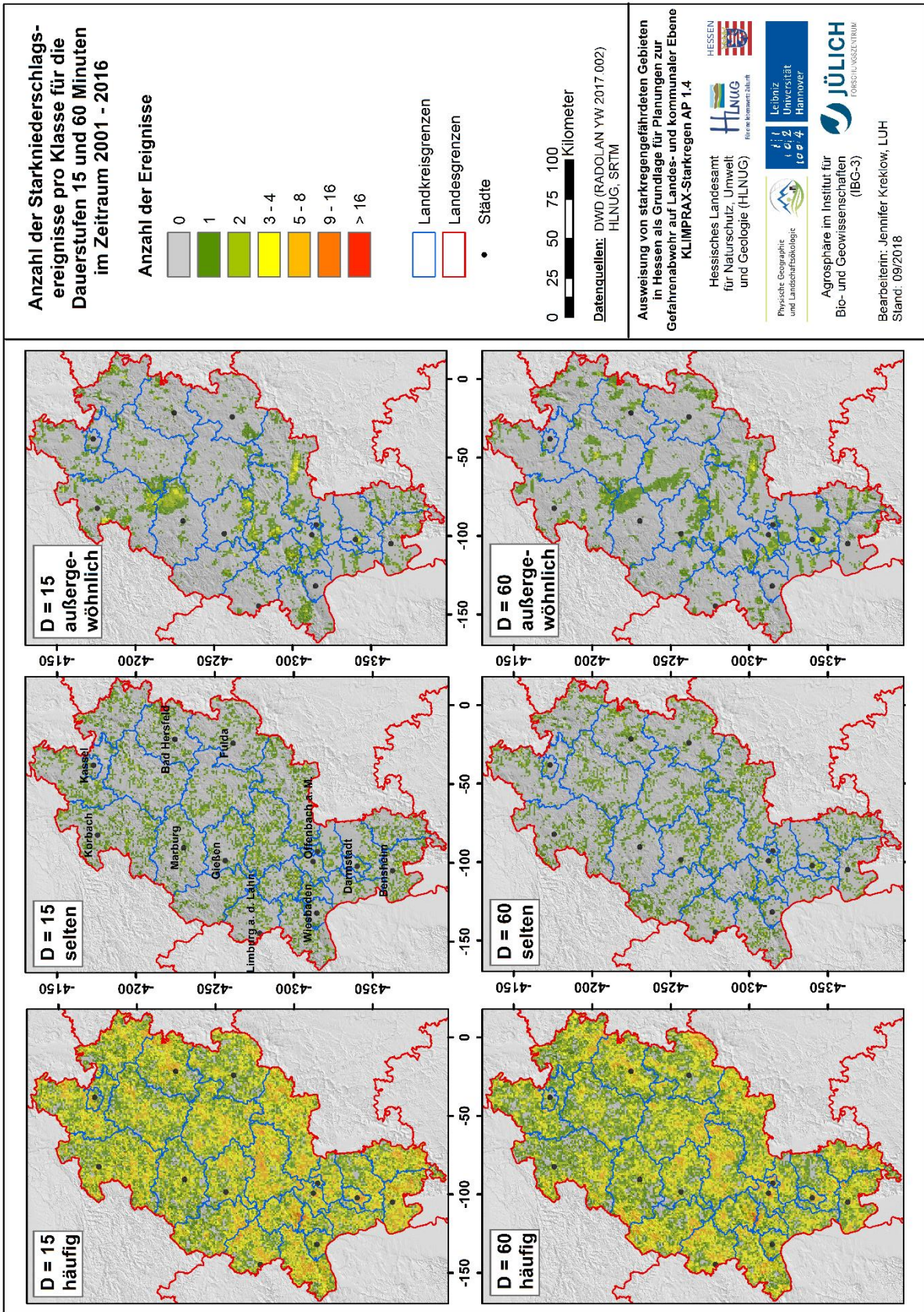
Im Vergleich der häufigen Ereignisse ist auffällig, dass $D = 15$ Min größere Häufigkeiten im Bereich der Wetterau und im nördlichen Hessen aufweist, während die Anzahl der Ereignisse bei $D = 60$ in den mittel- und nordhessischen Mittelgebirgen, insbesondere im Gladenbacher Bergland, in der Rhön und am Vogelsberg, höher ist. Die räumliche Verteilung zeigt mit zunehmender Dauerstufe somit einen merklich zunehmenden orographischen Einfluss.

Auffällig ist zudem bei beiden Dauerstufen, dass sich bei den außergewöhnlichen Ereignissen deutlich die Form einzelner Starkregenzellen durchprägt, wohingegen die seltenen Ereignisse eine unstrukturiertere Verteilung mit vielen Einzelpixeln aufweisen. Bei $D = 60$ Min ist in Klasse 2 zudem an mehreren Stellen der Umriss der Zellen aus Klasse 3 zu erkennen, d.h. die Intensität der außergewöhnlichen Starkregenzellen fällt in den Randbereichen ab und erreicht somit nur Klasse 2.

Insgesamt wurden für $D = 60$ Min unabhängig vom Ort an 9533 Zeitpunkten verteilt über 218 Tage Starkregen der Klasse 1 selektiert (Tab. 7). Bei $D = 15$ Min sind es in Klasse 1 ca. 50 Zeitpunkte weniger, die sich jedoch über 90 Tage mehr verteilen. In den beiden höheren Klassen ist das Verhältnis ähnlich: Starkregen der Dauerstufe $D = 60$ Min kommen auf Grund ihrer höheren Lebensdauer an etwas mehr Zeitpunkten vor, die Schwellenwerte werden jedoch an weniger Tagen überschritten.

Tab. 7: Anzahl der ermittelten Starkregen an unterschiedlichen Zeitpunkten und Tagen pro Klasse

Anzahl unterschiedlicher ... mit Starkregen	D15 K1	D15 K2	D15 K3	D60 K1	D60 K2	D60 K3
Zeitpunkte	9482	2514	1295	9533	2422	1315
Tage	611	280	190	521	218	131



Karte 10: Anzahl der Starkniederschlagsereignisse pro Klasse für die Dauerstufen D = 15 und D = 60 Minuten

Die genauen Orte und Zeitpunkte können neben den Dataframes und exportierten Excel-Tabellen auch den Feature-Classes der RADKLIM-IDs entnommen werden. Diese können im GIS über die Rasterdatensätze gelegt werden und per Identify-Tool oder Selektion lassen sich dann die exakten Zeitpunkte pro Dauerstufe und Klasse für jedes RADKLIM-Pixel auslesen (Abb. 16). Diese Informationen sind notwendig zur Validierung des Starkregenhinweis-Index (Kap. 5.3).

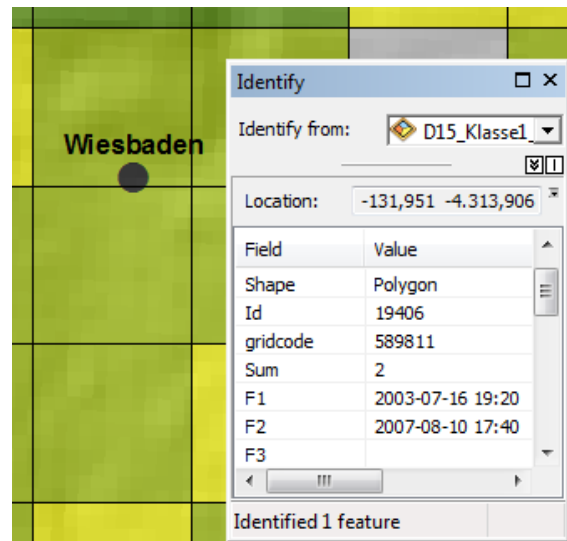


Abb. 16: Auszug aus dem "Starkregen-Informationssystem"

5 Projektbaustein 4 - Erstellung von Starkregen-Hinweiskarten Teil 2

In Kapitel 4 wurde bereits die Niederschlagscharakteristik untersucht und räumliche Schwerpunkte von Starkregen in Hessen ausgewiesen. Diese Informationen bilden den ersten Teil der Starkregen-Hinweiskarte. Nachfolgend werden Auswertungen von Relief, Landnutzung und Abflussgeschehen dargelegt, deren Ergebnisse zum Starkregenhinweis-Index sowie zum Vulnerabilitäts-Index führen, die Teil 2 der Starkregen-Hinweiskarte darstellen.

5.1 Der Starkregenhinweis-Index

Der Starkregenhinweis-Index wurde im Rahmen dieses Projekts neu entwickelt. Er wird aus drei Komponenten für jede 1 km² große Rasterzelle ermittelt: Der Häufigkeit der Überschreitung von Starkregen-Schwellenwerten, dem Ausmaß der Versiegelung sowie der Überflutungsgefahr in versiegelten Gebieten, d.h. dem Auftreten und der Größe von Senken und Abflussbahnen (Abb. 17). Den Ausprägungen der Komponenten werden Gewichte („Indexwerte“) zugewiesen, aus deren Addition sich der Starkregenhinweis-Index ergibt. Die Summe wird in die vier Kategorien „schwach“ bis „hoch“ klassifiziert. Die Indexwerte wurden so gesetzt, dass sich für stark versiegelte und gleichzeitig stark reliefierte Rasterzellen auch dann noch ein erhöhter Starkregenhinweis-Index ergeben kann, wenn die RADKLIM-Daten keine Starkregenereignisse ausweisen. Die in diesem Projekt zur Verfügung stehenden RADKLIM-Daten erfassen eine Zeitreihe von weniger als 20 Jahren, sodass klimatologische Aussagen nur mit Einschränkungen gemacht werden können. Die Plausibilisierung der Starkregenhinweis-Karte mit beobachteten Ereignissen zeigt, dass Überflutungen auch aus Starkregen in Nachbarzellen resultieren können. Auf Ursachen von Abweichungen zwischen Radarmessungen und gefallenem Niederschlag weisen u.a. SENE (2010) und PEUBNER (2013) hin. Daher ist durch die Wahl der Indexwerte sicherzustellen, dass sich die RADKLIM-Daten nur moderat auf den Index auswirken.

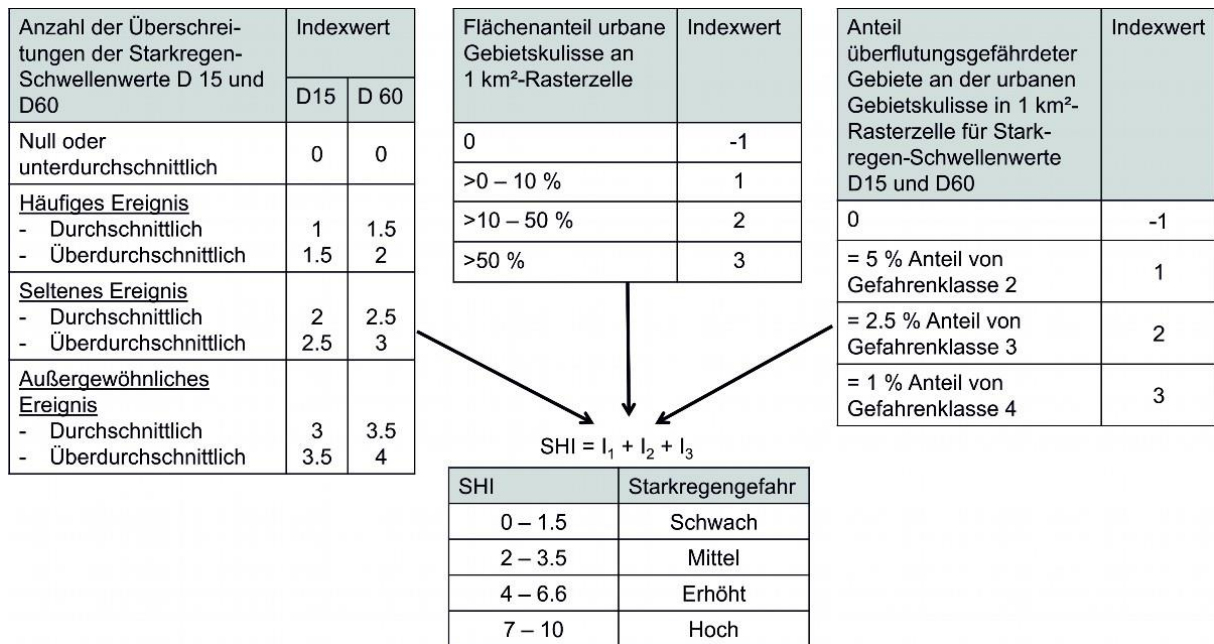


Abb. 17: Ableitung eines Starkregenhinweis-Index für 1*1 km² Gitterzellen

Tab. 8 zeigt die für die Ableitung des Starkregenhinweis-Index erforderlichen Eingangsdaten. In den nachfolgenden Unterkapiteln werden die drei Komponenten sowie der Verfahrensgang zu ihrer Ableitung eingehender beschrieben.

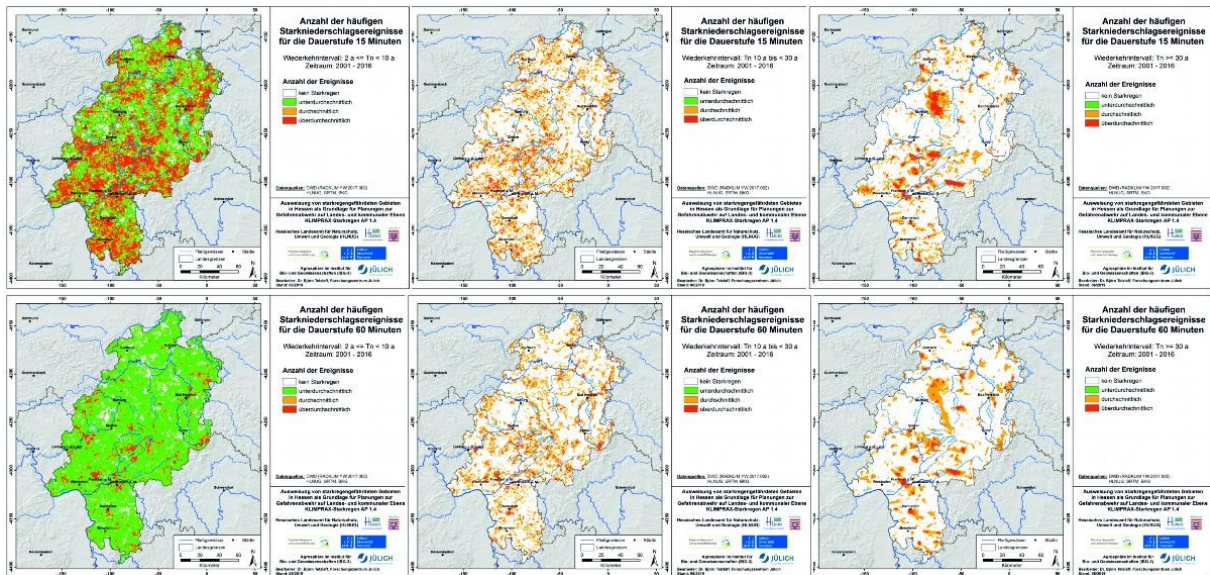
Tab. 8: Benötigte Eingangsdaten für die Ableitung des Starkregenhinweis-Index (SHI)

Eingangsdaten	Datenquelle	Parameter	Bereitsteller
Radardaten des Niederschlags	RADKLIM 2001-2016	Anzahl Starkregen über Schwellenwerten	DWD, Auswertung durch LUH
DGM	DGM 1		HVBG
Landnutzung	ALKIS		HVBG
Ortslagen	ATKIS		HVBG
Gitterzellen 1·1 km ²	Geogitter	1 km ²	BKG

5.1.1 Eingangsdaten für den Starkregenhinweis-Index

Häufigkeit der Starkniederschlagsereignisse

Die Anzahl der Überschreitungen von Starkregen-Schwellenwerten sowohl der Dauerstufe 15 min als auch der Dauerstufe 60 min ergibt sich aus der Auswertung der RADKLIM-Daten (Karte 10). Für jede Dauerstufe und jedes Wiederkehrintervall wurde eine primärstatistische Auswertung der Anzahl der Starkregenereignisse vorgenommen. Die Ergebnisse wurden in vier Kategorien klassifiziert (Karte 11). Das durchschnittliche Auftreten einer Starkregen-Kategorie wird dabei durch den jeweiligen Median definiert.



Karte 11: Auswertung der Häufigkeit von Starkniederschlagsereignissen

Zwecks Verschneidung mit weiteren Geodaten zur Ableitung des Starkregenhinweis-Index müssen die RADKLIM-Daten, die originär in einer auf den Nordpol bezogenen Azimutalprojektion („North Pole Stereographic“) vorliegen, in das Projektionssystem ETRS 89 projiziert werden. Letzteres bildet die Projektionsgrundlage der von HVBG und BKG beschafften Daten (Tab. 8).

Gleichzeitig wird die Rasterweite von etwa 950 m auf 1000 m verändert. Dabei treten unvermeidlich Lageversatz zwischen 300 und 500 m sowie Veränderungen im Wertebereich auf. Bezogen auf das gesamte Bundesland Hessen machen diese zwischen 4 und 10 % aus (Abb. 18).

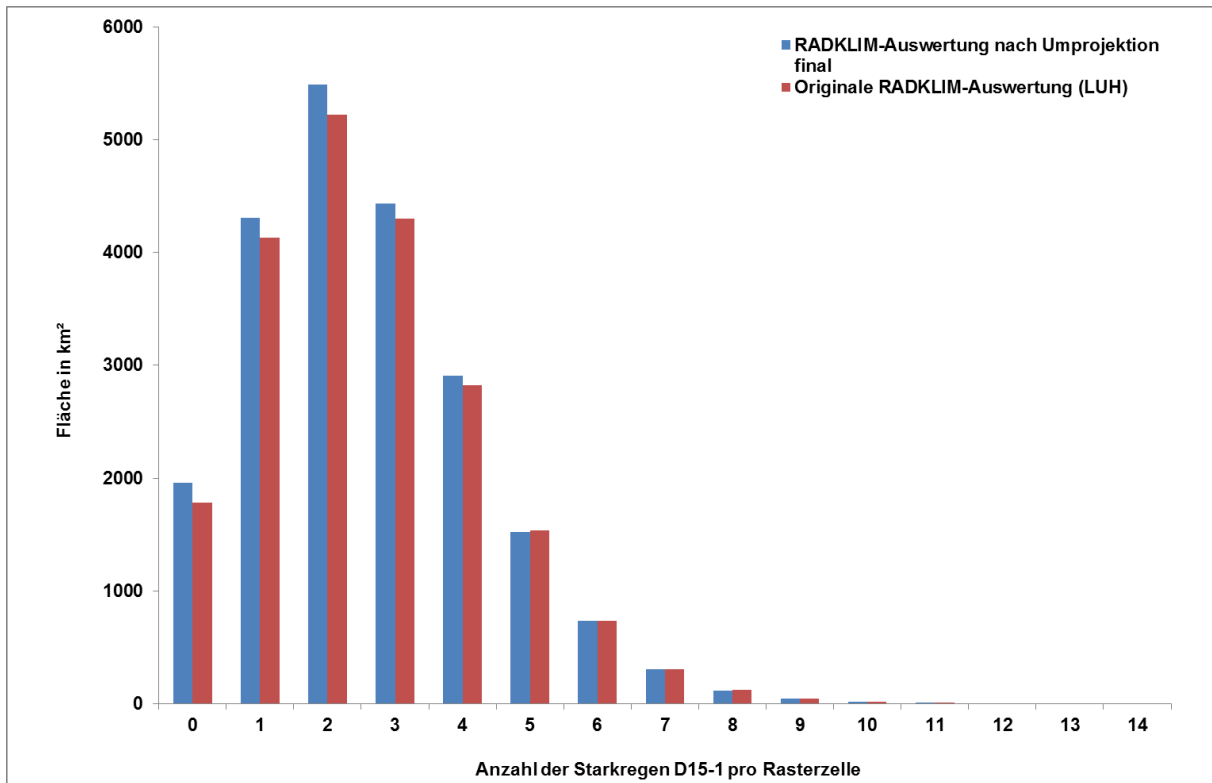
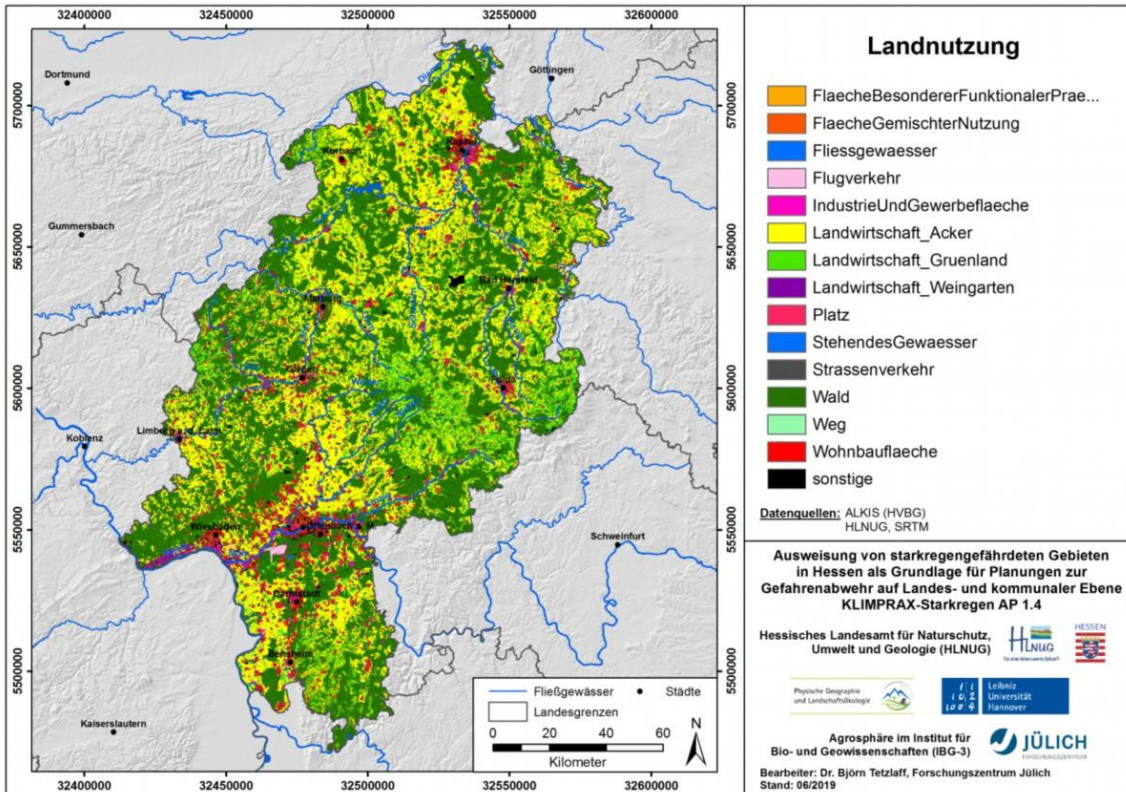


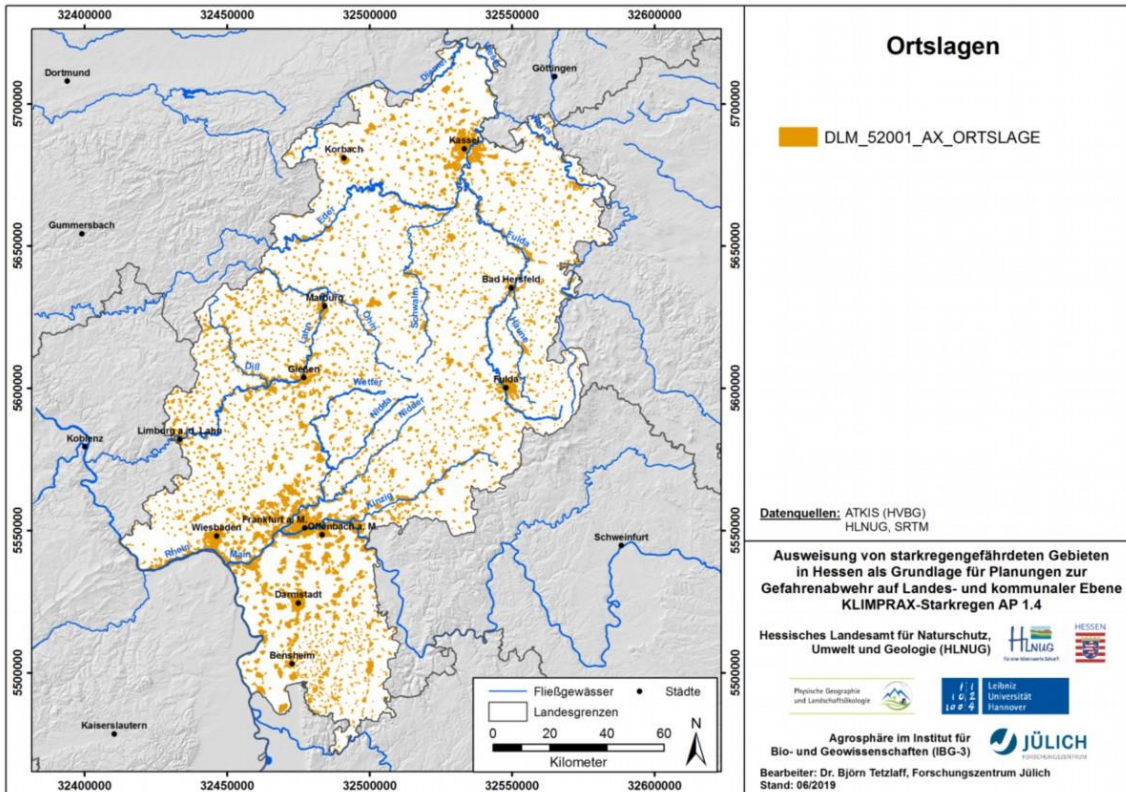
Abb. 18: Änderungen des Flächenanteils von Starkregenhäufigkeiten vor und nach Umprojektion

Urbane Gebietskulisse

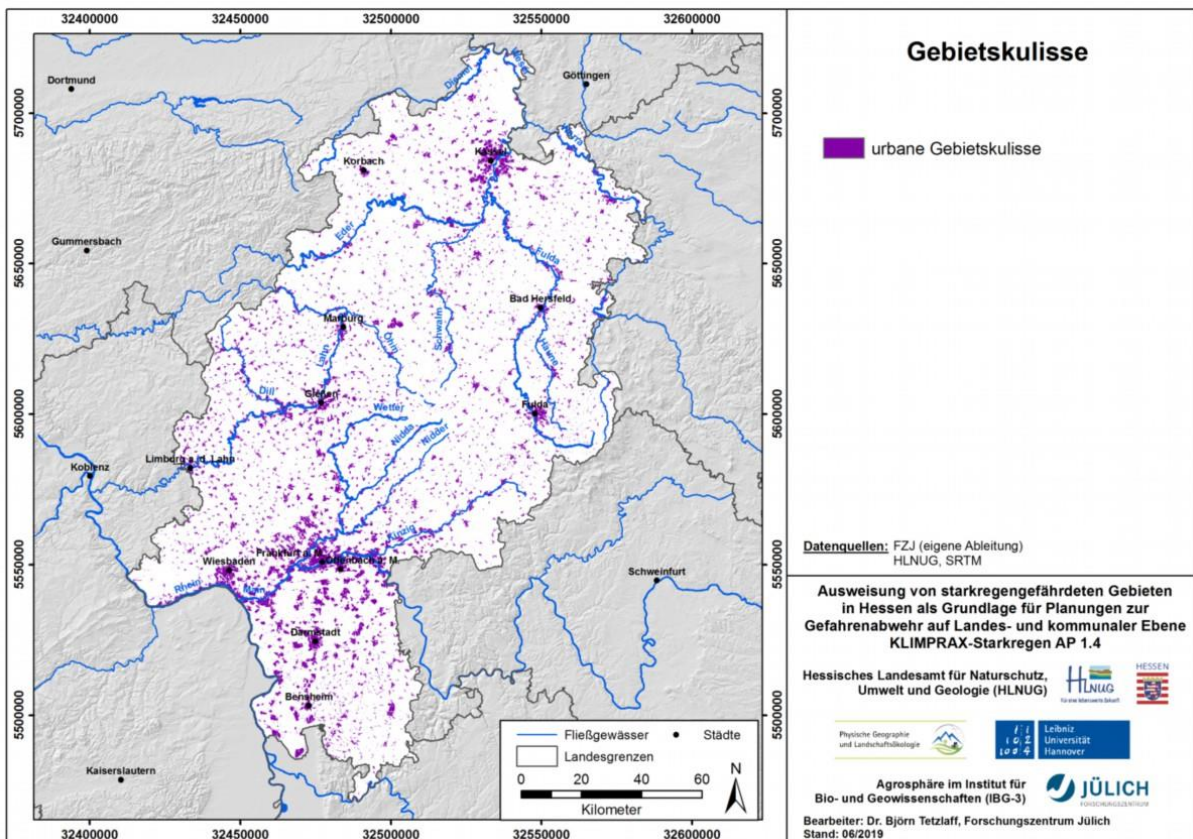
Die zweite Komponente zur Ableitung des Starkregenhinweis-Index (SHI) ist der Anteil total versiegelter Fläche an der 1 km² großen Gitterzelle, die den Raumbezug des SHI definiert. Als Datenquellen dienen die Landnutzung aus ALKIS (Karte 12) sowie die Ortslagen aus ATKIS (Karte 13, Tab. 8). Die für die Ausweisung der (teil-)versiegelten Fläche herangezogenen Objektarten sind „Fläche besonderer funktionaler Prägung“, „Fläche gemischter Nutzung“, „Industrie- und Gewerbefläche“, „Platz“, „Straßenverkehr“, „Weg“ sowie „Wohnbaufläche“. Aus ALKIS ergeben sich für Hessen ca. 2955 km² (teil-)versiegelte Flächen. Durch Verschneidung mit den Polygonen der 3864 Ortslagen wird sichergestellt, dass später nur innerörtliche und potenziell überflutungsgefährdete Bereiche erfasst werden, für die die kommunalen Entscheidungsträger zuständig sind. Ausnahmen werden für „Industrie und Gewerbe“, „Flächen besonderer funktionaler Prägung“ sowie „Flächen gemischter Nutzung“ gemacht, da Luftbild- und Kartenabgleiche zeigen, dass sonst z.B. Gewerbegebiete oder Kasernen nicht berücksichtigt würden, hier jedoch hohe Sachwerte gefährdet sein können.



Karte 12: Landnutzung nach ALKIS



Karte 13: Ortslagen nach ATKIS



Karte 14: Abgeleitete urbane Gebietskulisse

Die (teil-)versiegelten Landnutzungen innerhalb der Ortslagen bilden die urbane Gebietskulisse, die den zweiten Baustein des Starkregenhinweis-Index darstellt (Abb. 17). Karte 14 zeigt das Ergebnis der abgeleiteten urbanen Gebietskulisse, die ca. 1900 km² oder 9 % der hessischen Landesfläche umfasst. Neben den Groß- und Mittelstädten fallen v.a. die zahlreichen, auch im Mittelgebirge gleichmäßig verteilten Dörfer auf. Die Bestimmung des Anteils versiegelter Fläche an der Gitterzelle mit Zuweisung der Indexwerte ist Gegenstand von Kapitel 5.1.2.

Modellierung der Überflutungsgefährdeten Flächen in der urbanen Gebietskulisse

Zur Ermittlung des Anteils überflutungsgefährdeter Flächen an der urbanen Gebietskulisse (Abb. 17) müssen Senken und Fließwege modelliert werden. Zunächst ist hierbei der Begriff „überflutungsgefährdet“ zu definieren. Das DWA-Merkblatt 119 (2016) sieht zur Einstufung der Überflutungsgefahr vier Kategorien vor, die sich nach überflutungsrelevanten Eigenschaften von Senken und Fließwegen (Tab. 9) oder nach Wasserständen (Tab. 10) richten. In Anlehnung an DWA (2016) wird in dieser Studie eine „Überflutungsgefahr“ angenommen, wenn Zustände erreicht sind, die nach diesen Tabellen eine Einstufung in die Gefahrenklassen 2 bis 4 erlauben.

Tab. 9: Klassifizierung der Überflutungsgefahr von Senken und Fließwegen (DWA M 119, 2016)

Gefahrenklasse	Überflutungsgefahr	Spezifisches Retentionsvolumen einer Senke	Akkumulierte Einzugsgebietsfläche entlang eines Fließwegs
1	gering	abseits einer Senke	abseits eines Fließwegs (< 1 ha)
2	mäßig	100 m ³ /ha bis > 500 m ³ /ha	1 ha bis 5 ha
3	hoch	50 m ³ /ha bis 100 m ³ /ha	5 ha bis 10 ha
4	sehr hoch	< 50 m ³ /ha	> 10 ha

Tab. 10: Klassifizierung der Überflutungsgefahr nach Wasserständen (DWA M 119, 2016)

Gefahrenklasse	Überflutungsgefahr	Wasserstand
1	gering	< 10 cm
2	mäßig	10 cm – 30 cm
3	hoch	30 cm – 50 cm
4	sehr hoch	> 50 cm

Die Modellierung überflutungsgefährdeter Flächen im urbanen Raum kann auf unterschiedliche Arten durchgeführt werden (DWA 2016). In diesem Projekt wurden mehrere Herangehensweisen getestet und die Ergebnisse miteinander verglichen:

- Reliefanalyse mit ArcGIS
- Wasserstandsmodellierung mit DHI-FloodScreener
- Hydrodynamische 2D-Modellierung der Wasserstände mit HEC-RAS

Die GIS-gestützte Reliefanalyse benötigt als Eingangsdaten lediglich ein DGM und liefert als Ergebnis Flächen, in denen mit konzentriertem Abfluss zu rechnen ist, d.h. Senken mit Volumen und Einzugsgebietsgröße sowie Fließwege und ihre Einzugsgebietsgröße. Damit sind qualitative Aussagen zum potenziellen Auftreten von konzentriertem Abfluss in Geländetiefpunkten möglich. Die Ergebnisse erlauben jedoch keine zeitliche Variabilität und es können keine Wasserstände ermittelt werden.

Mit der Software FloodScreener der Firma DHI können Überflutungsanalysen durchgeführt werden. Auf Basis eines DGM und einer frei wählbaren Niederschlagshöhe werden potenzielle Überflutungsflächen und deren Wasserstand ausgewiesen. Die Betrachtungsweise ist jedoch zeitlich invariant, d.h. es werden maximale Wasserstände in Senken ausgewiesen. Überflutungen an Fließwegen werden nicht erfasst. Die Niederschlagshöhe hat Auswirkungen auf das Ergebnis, die Niederschlagsdauer jedoch nicht.

Anders ist dies bei einer zweidimensionalen hydrodynamischen Modellierung, die den größten Rechenaufwand erfordert. Als Ergebnis werden von Niederschlagshöhe und -dauer abhängige Wasserstände bereitgestellt, deren Simulation Daten zum Relief sowie zur Niederschlagscharakteristik und Landnutzung erfordert (Tab. 8). Als Modell wurde das frei verfügbare physikalisch basierte HEC-RAS eingesetzt, das vom Hydrologic Engineering Center des US Army Corps of Engineers entwickelt wurde. Kern ist die Saint-Venant-Gleichung, die aus der Kontinuitätsgleichung

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0$$

und der Impulsgleichung

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= -g \frac{\partial H}{\partial x} + v_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f_v \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} &= -g \frac{\partial H}{\partial y} + v_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f_u \end{aligned}$$

besteht. Dabei stellt H den Wasserstand, h die Wassertiefe, u und v die Geschwindigkeiten in x- und y-Richtung, q die externen Quellen und Senken, t die Zeiteinheit, g die Erdbeschleunigung, v_t die turbulente kinetische Viskosität, c_f das Sohlgefälle und f den Coriolisparameter dar.

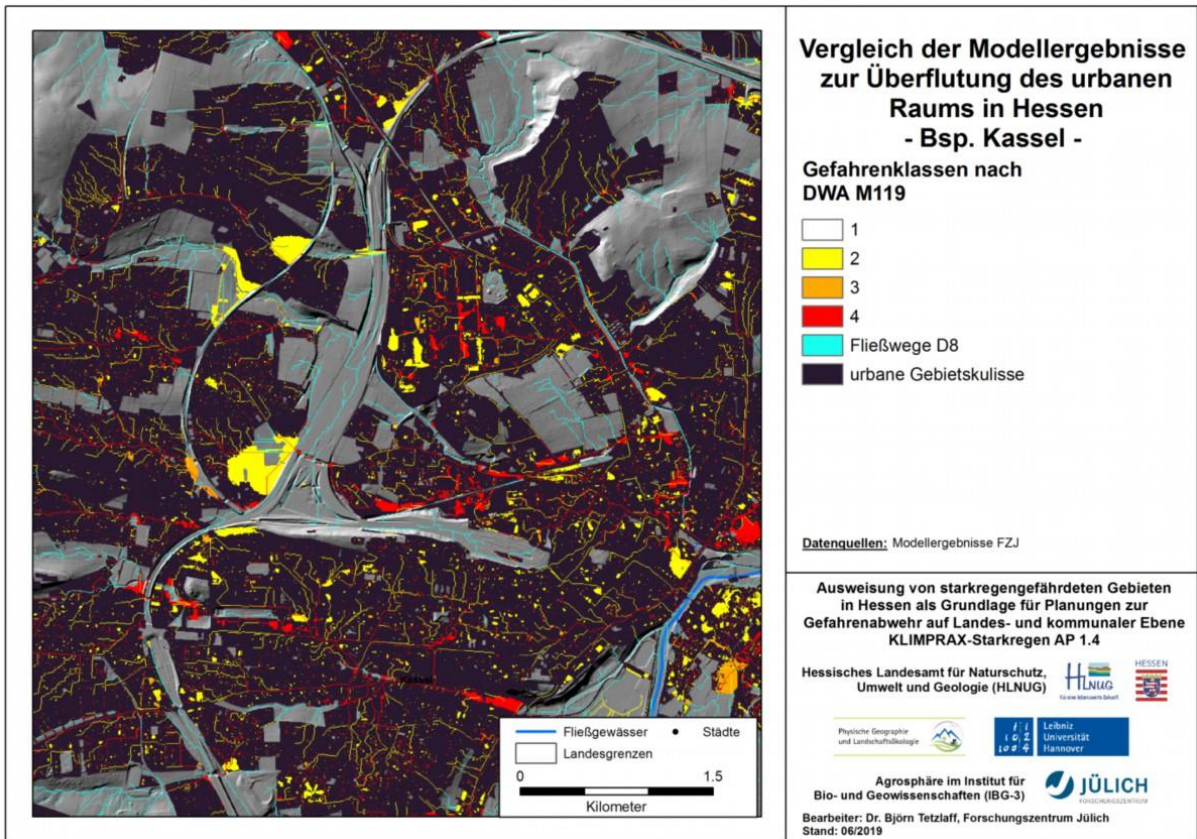
Bei den meisten Modellansätzen für den Oberflächenabfluss, bei dem die Strömung im Wesentlichen vom Gravitationspotenzial angetrieben wird, können die Terme der Beschleunigung, Advektion, Turbulenz und Corioliskraft vernachlässigt werden (RICHARDSON U. JULIEN 1994). LETTENMAIER UND WOOD (1993) zeigten, dass bei Hangneigungsverhältnissen, wie sie auch in Hessen auftreten, die diffusive Wellengleichung ausreichende Genauigkeit bietet. Daher wird die Impulsgleichung vereinfacht zu:

$$\begin{aligned} g \frac{\partial H}{\partial x} &= -c_f u \\ g \frac{\partial H}{\partial y} &= -c_f v \end{aligned}$$

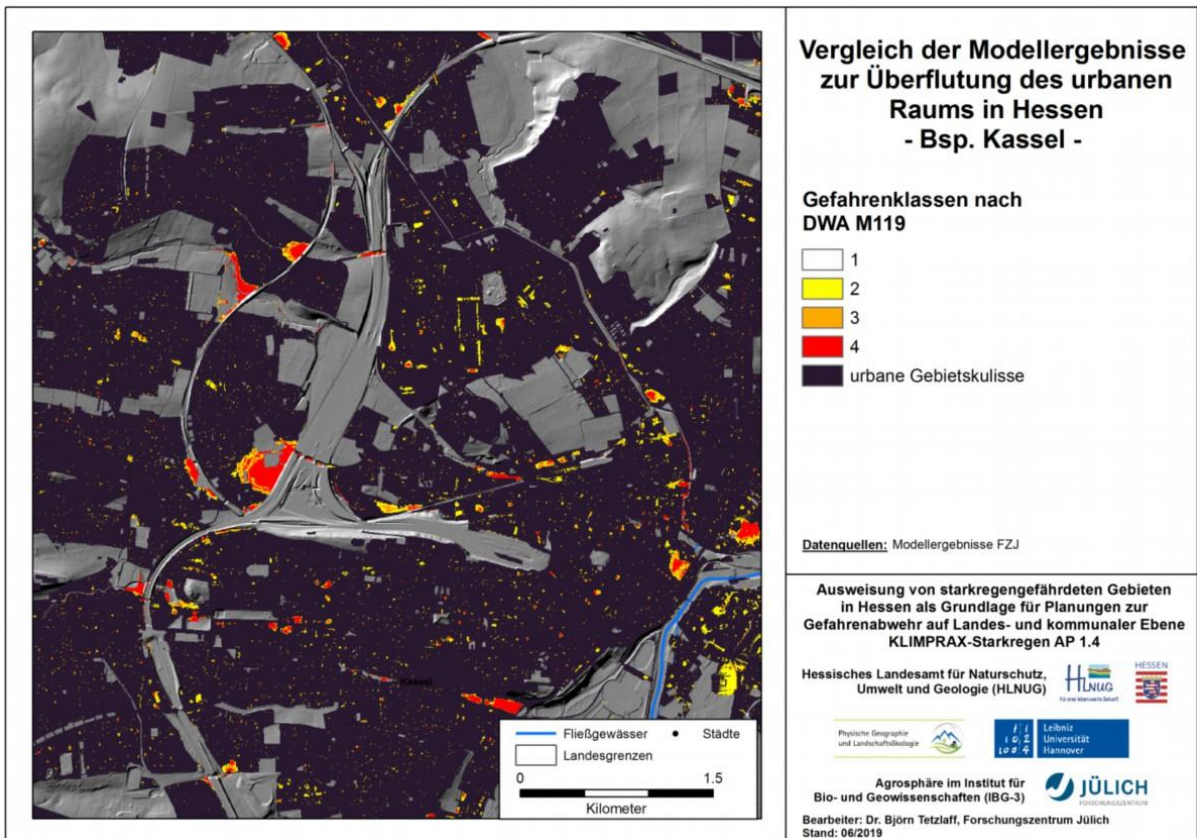
Im Folgenden wird daher die diffusive Wellengleichung verwendet. Alle drei Modellierungsansätze wurden vergleichend zur Anwendung gebracht und die Ergebnisse für ein Testgebiet in Kassel verglichen. Der Modellvergleich ist in den nachfolgenden Karten dargestellt.

Der Vergleich der nachfolgenden Karten miteinander zeigt deutliche Unterschiede in den Modellergebnissen. Die Ergebnisse der Reliefanalyse (Karte 15) besitzen den größten Flächenumfang, weil alle Fließwege mit Einzugsgebieten ab 1 ha dargestellt werden und die Senken stark betont werden, unabhängig davon, ob die konkrete Niederschlagsmenge ausreicht, die Senken zu füllen. Karte 16 zeigt die Ergebnisse des Modells FloodScreener. Dargestellt sind Endzustände, d.h. sämtlicher Niederschlag hat sich an den tiefsten Geländepunkten konzentriert. Dementsprechend werden wie in Karte 15 die Senken stark betont, das räumliche Ausmaß ist jedoch deutlich geringer, weil die konkrete Niederschlagsmenge in das Modell eingeht. In Karte 17 und Karte 18 sind die Ergebnisse der Modellierung mit HEC-RAS zu sehen, wobei sich deutliche Unterschiede, auch zu den vorherigen Karten, zeigen. Grundsätzlich werden die großen reliefbedingten Senken weniger überflutet, weil Niederschlagsmenge und -dauer sowie die Fließzeit nicht ausreichen, diese Senken vollständig zu füllen. Mehr Bedeutung erhalten daher die Fließwege – im Unterschied zu Karte 15 in zweidimensionaler Ausdehnung – und bei 60 Minuten Regendauer auch die kleineren Senken (Karte 18).

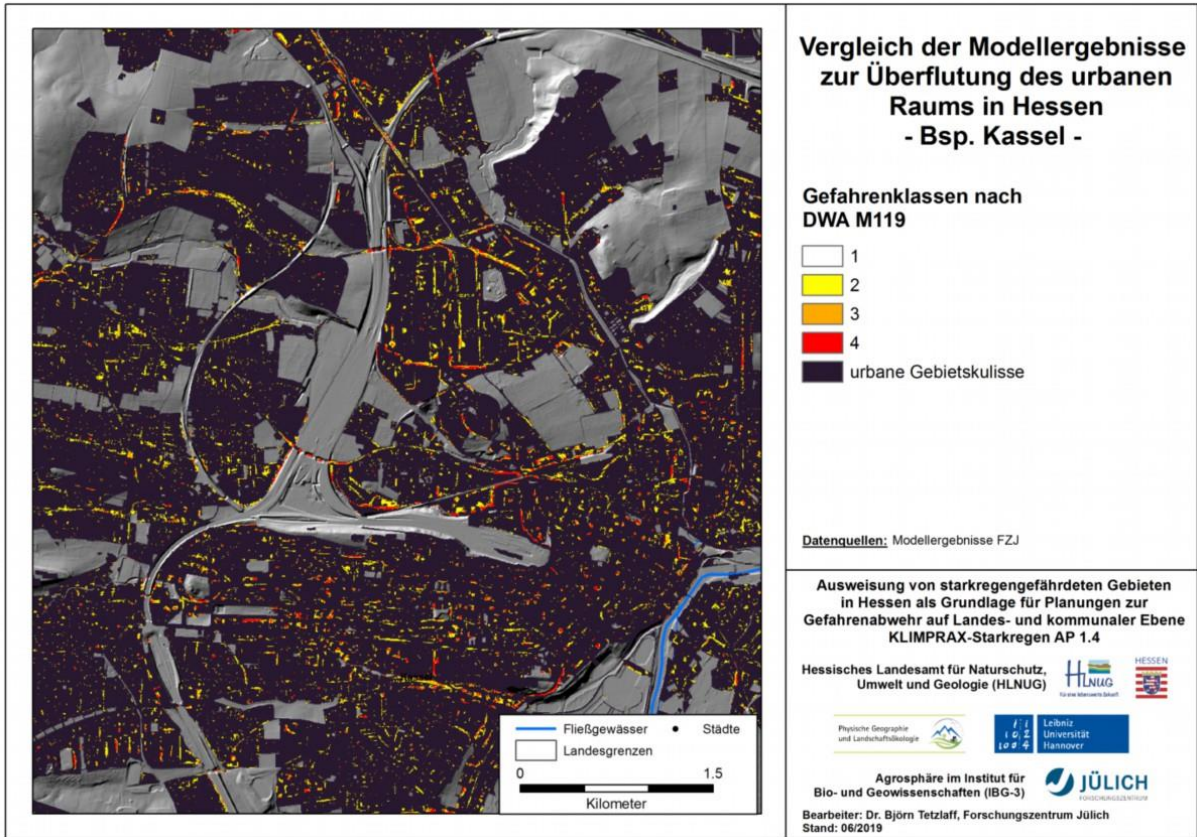
Als für dieses Projekt zielführend wird die zweidimensionale hydrodynamische Modellierung angesehen, weil sie als einzige Methode die Effekte der dynamischen Eingangsdaten (zwei Dauerstufen und drei Wiederkehrintervalle) abbilden kann. Trotz der deutlich längeren Rechen- und damit Projektbearbeitungszeiten wird damit dem Modell HEC-RAS der Vorzug gegeben. Aus Gründen der Rechenzeit und dem Zwang zur Glättung von kleinräumigen „Störmustern“, z.B. Fahrspuren, wurde das DGM 1 auf 5 m aggregiert. Die Modellierung der Wasserstände für die sechs Niederschlagscharakteristika erfolgt aufgrund des Aufwandes gekachelt und iterativ für 22 Einzugsgebiete. Nach optischer Kontrolle der Ergebnisse erfolgt automatisiert die Klassifizierung der Überflutungsgefahr nach Tab. 10 und die anschließende Löschung der hoch aufgelösten HEC-RAS-Ergebnisse, bevor mit dem nächsten Lauf begonnen wird. Die Modellierungen erfolgen für jede Dauerstufe und alle Schwellenwerte.



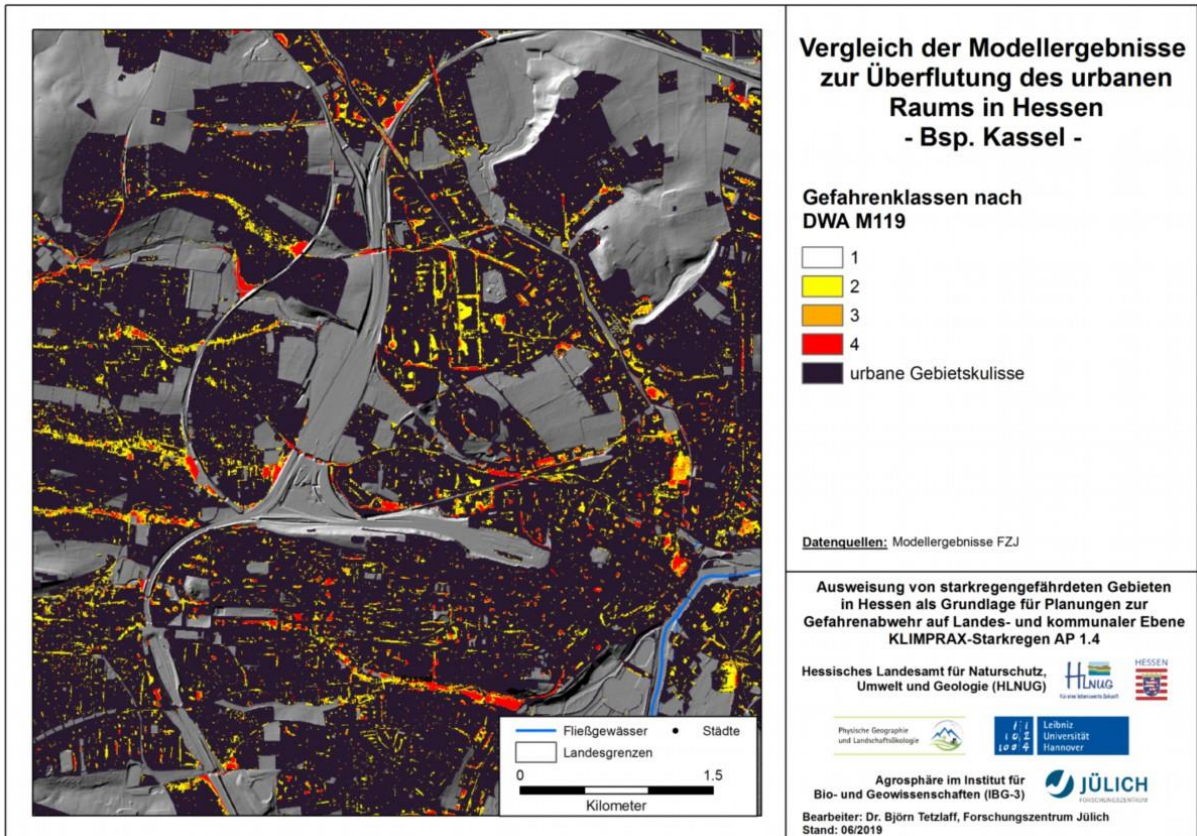
Karte 15: Ausweisung überflutungsgefährdeter Flächen auf Basis der GIS-gestützten Reliefanalyse



Karte 16: Ausweisung überflutungsgefährdeter Flächen auf Basis des Modells FloodScreener für D 60-3



Karte 17: Ausweisung überflutungsgefährdeter Flächen auf Basis des Modells HEC-RAS für D 15-1

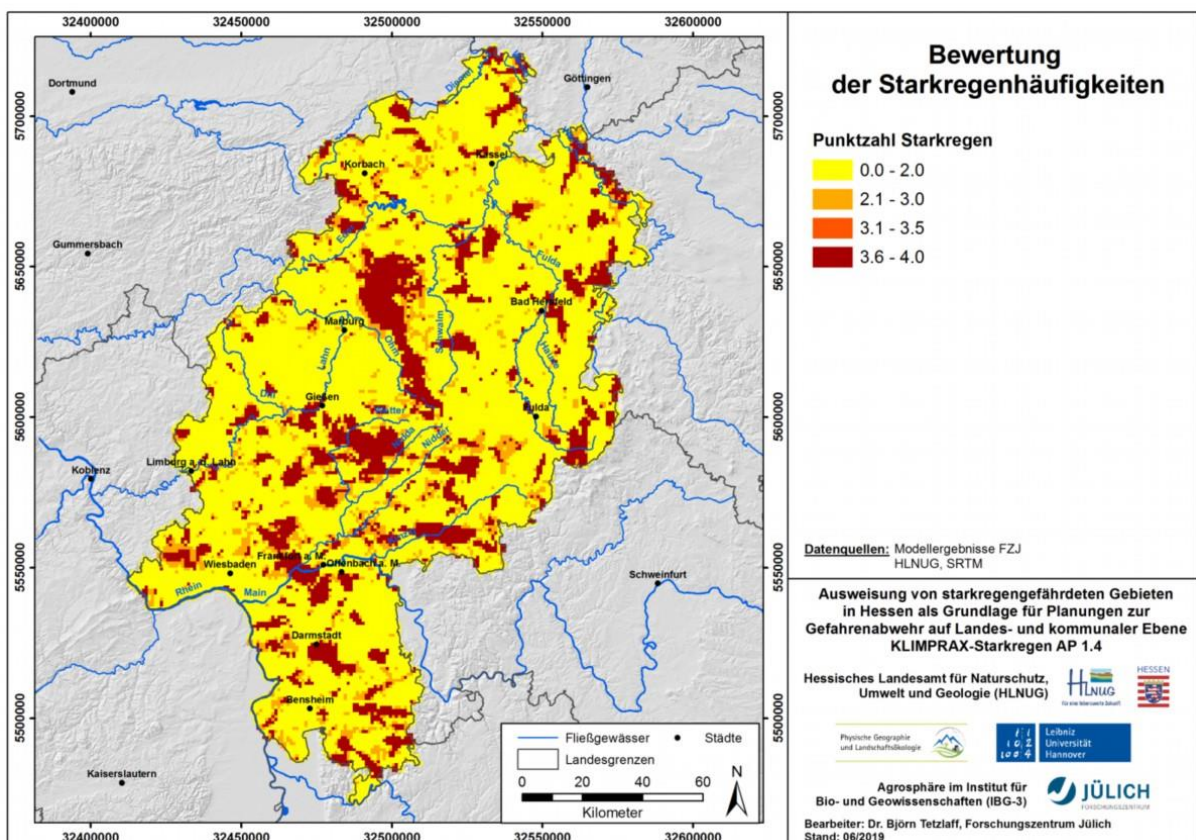


Karte 18: Ausweisung überflutungsgefährdeter Flächen auf Basis des Modells HEC-RAS für D 60-3

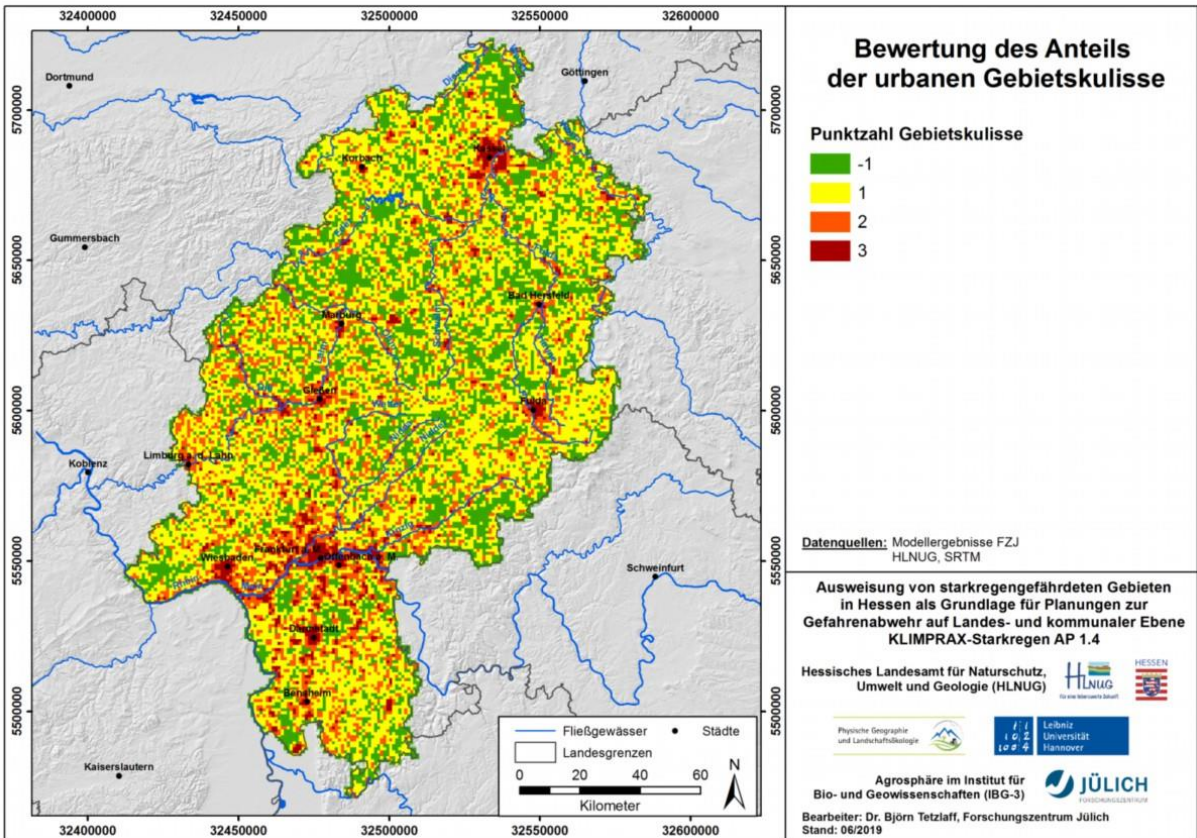
5.1.2 Ermittlung des Starkregenhinweis-Index

Wie aus Abb. 17 entnommen werden kann, errechnet sich der Starkregenhinweis-Index aus den Komponenten Überschreitungshäufigkeit von Starkregen-Schwellenwerten, Flächenanteil urbane Gebietskulisse und Anteil überflutungsgefährdeter Gebiete an der Gebietskulisse. Die Erstellung bzw. Aufbereitung der hierzu erforderlichen Eingangsdaten wurde bereits im vorangegangenen Kapitel beschrieben. Diese Eingangsdaten Starkregenhäufigkeit (Karte 11), urbane Gebietskulisse (Karte 14) sowie Überflutungsgefährdung (z.B. Karte 18) werden mit 1 km² großen Gitterzellen verschnitten und die Häufigkeiten bzw. Flächenanteile für jede Zelle bestimmt. Diesen Ergebnissen werden die Indexwerte nach Abb. 17 zugewiesen. Die dadurch entstehenden Datensätze bilden die Grundlage für den Starkregenhinweis-Index, der durch Addition der drei Komponenten bestimmt wird. Nachfolgend werden die Datensätze kartographisch dargestellt und diskutiert.

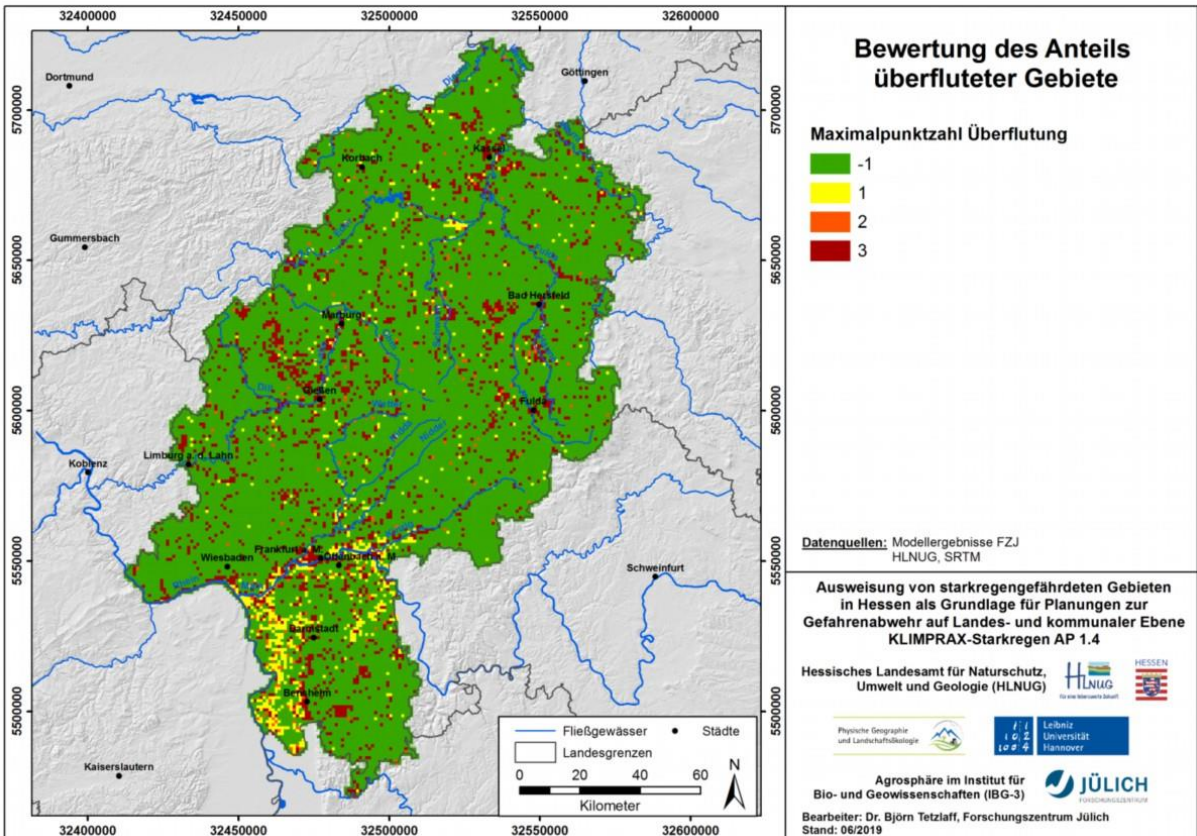
Karte 19 zeigt die Indizierung der Starkregenhäufigkeiten nach Karte 11 für jede 1 km² große Gitterzelle. Der größte Teil Hessens wird dabei mit niedrigen Punktzahlen von unter 2 belegt, d.h. hier treten im Zeitraum 2001-2016 nach Maßgabe der RADKLIM-Daten keine Starkregen oder Starkregen auf, die i.W. als häufige Ereignisse mit der Intensität und Dauer eines Bemessungsregens gewertet werden können (Tab. 6). Die Karte weist jedoch auch räumlich stark abgegrenzte Teilgebiete mit Indexwerten über 3,5 auf, d.h. Gebiete mit einem hohen Anteil außergewöhnlicher Ereignisse mit Dauerstufe D15 bzw. D 60. Diese sind im Raum Frankfurt, südlich von Darmstadt sowie in Mittelhessen besonders ausgeprägt.



Karte 19: Bewertung der Komponente „Starkregenhäufigkeit“ als Teil des Starkregenhinweis-Index



Karte 20: Bewertung der Komponente „Gebietskulisse“ als Teil des Starkregenhinweis-Index



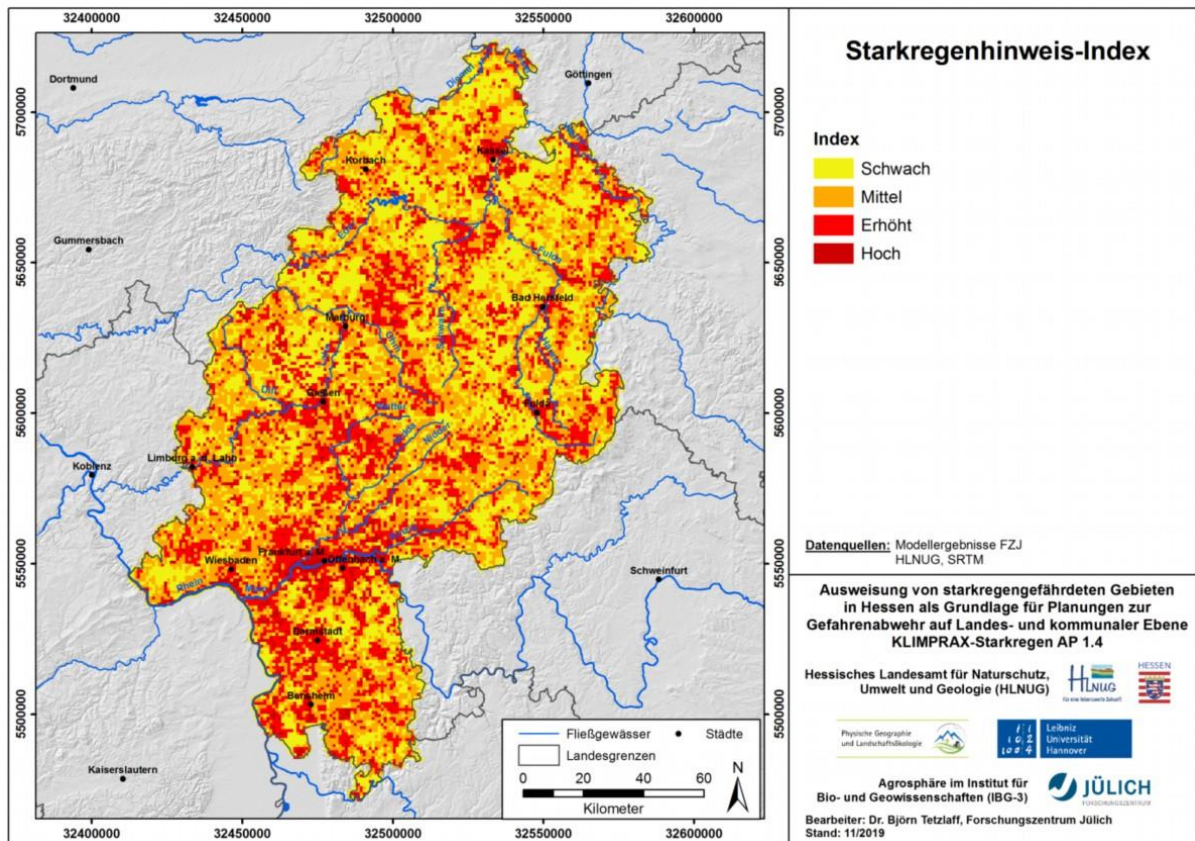
Karte 20 ist die Bewertung des Flächenanteils der urbanen Gebietskulisse an jeder 1 km² großen Gitterzelle zu entnehmen. Anhand des Flächenanteils jeder Objektart an der 1 km²-Gitterzelle sowie eines Versiegelungsanteils zwischen 45 % (z.B. Wohnfläche) und 95 % (z.B. Straßenverkehr) werden die total versiegelte Fläche zunächst absolut und nachfolgend ihr relativer Anteil an der Gitterzelle ermittelt. Hohe Werte ab 2 sind für Verdichtungsräume typisch und treten in den Groß- und Mittelstädten Hessens auf. Geringe Werte charakterisieren den ländlichen Raum.

Karte 21 zeigt die Bewertung der Überflutungsgefährdung für jede Gitterzelle. Dabei wird geprüft, welche Kombination aus Dauerstufe und Schwellenwert zum höchsten Indexwert für die Starkregenhäufigkeit führt (Abb. 17). Für diese Kombination wird das jeweilige Ergebnis der sechs hydrodynamischen Modellierungsläufe herangezogen und die überflutungsgefährdeten Gebiete nach DWA (2016) klassifiziert. Deren Anteil an der urbanen Gebietskulisse wird anschließend für jede Gefährdungsklasse nach DWA bestimmt. Das Maximum der dabei anzusetzenden Indexwerte bestimmt die Einstufung der 1 km² großen Gitterzelle. Karte 21 zeigt verbreitet niedrige Indexwerte. Dabei handelt es sich entweder um Gitterzellen ohne versiegelte Flächen oder um urbane Flächen, in denen ein Starkregen nicht zu modellierten Überflutungswasserständen von mindestens 10 cm führt. Hohe Indexwerte von 2 und v.a. 3 sind typisch für Gitterzellen mit einem relativ hohen Anteil von Arealen mit Wasserständen über 30 cm im Starkregenfall. Davon sind neben Frankfurt, Offenbach und dem Großraum Kassel v.a. das Lahn-Dill-Bergland betroffen, besonders Gießen und Umgebung, Herborn, Dillenburg, Haiger u.a.

5.1.3 Ergebnisse zum Starkregenhinweis-Index für Hessen

Durch Addition der Indexwerte aller drei Komponenten Starkregenhäufigkeit, urbane Gebietskulisse und Überflutungsgefährdung wird der Starkregenhinweis-Index bestimmt (Abb. 17). Das Ergebnis zeigt Karte 22. Hier ist zu erkennen, dass die Klassen „erhöht“ und „hoch“ in allen Landesteilen vorkommen, räumlich aggregiert jedoch v.a. im Raum Kassel, zwischen Marburg und Fritzlar, im Raum Wetzlar-Gießen-Nidda, im Großraum Wiesbaden-Frankfurt-Offenbach sowie im Raum Darmstadt. Diese räumlich differierenden Ergebnisse resultieren aus dem unterschiedlichen Zusammenspiel der einzelnen Komponenten: Während sich in den Verdichtungsräumen der Anteil der urbanen Gebietskulisse stark durchpaust, z.B. Kassel und Rhein-Main, erklären sich erhöhte Indexwerte im ländlichen Raum v.a. aus dem teilweise überdurchschnittlichen Auftreten von Starkregen hoher Intensität, u.a. zwischen Marburg und Fritzlar / Melsungen oder zwischen Gießen und Nidda (Karte 19) oder durch hohe Gefährdungen durch Überflutung, z.B. westlich Bad Hersfeld oder nordwestlich von Gießen im Lahn-Dill-Bergland (Karte 21). Für 39 % der Landesfläche wird der Index „schwach“, für 33 % „mittel“, für 22 % „erhöht“ und für 6 % „hoch“ ausgewiesen.

Zwecks Priorisierung von Gebieten mit einer erhöhten Gefährdung durch Starkregen sollten die Klassen „erhöht“ und „hoch“ zusammen betrachtet werden. Die Ergebnisse zum Starkregenhinweis-Index werden anhand von dokumentierten Schadenereignissen plausibilisiert. Dies ist Gegenstand von Kapitel 5.3.



Karte 22: Starkregenhinweis-Index für Hessen

5.2 Vulnerabilitäts-Index

Die durch den Starkregenhinweis-Index bewerteten versiegelten Flächen können bei gleichem Gefährdungspotenzial eine unterschiedliche Vulnerabilität aufweisen, die sich aus Standortfaktoren ergeben, die räumlich variierende Schadenspotenziale, Sachwerte oder Bedarf an Rettungskräften beschreiben. Die Auswahl der Standortfaktoren folgt subjektiven Kriterien und orientiert sich an der Verfügbarkeit landesweit vollständiger und konsistenter Eingangsdaten. Folgende Standortfaktoren werden in dieser Arbeit betrachtet:

- Bodenerosionsgefahr im hydrologischen Einzugsgebiet des urbanen Raums (erhöht die Gefahr von „Schlammlawinen“)
- Anzahl Industrie und Gewerbebetriebe (höhere Sachwerte und höhere Gefahr von Gefahrstoffaustrag)
- Bevölkerungsdichte (variierende Sachwerte und unterschiedliche Bedarfe an Rettungskräften)
- Krankenhäuser (höherer Bedarf an Rettungskräften und größere Schwierigkeiten der Verkehrsanbindung im Überflutungsfall)

Abb. 19 zeigt die Vorgehensweise bei der Ableitung des Vulnerabilitäts-Indexes durch Klassifizierung der Eingangsdaten, Zuweisung von Indexwerten zu den Klassen und Addition der Indexwerte zum Vulnerabilitäts-Index.

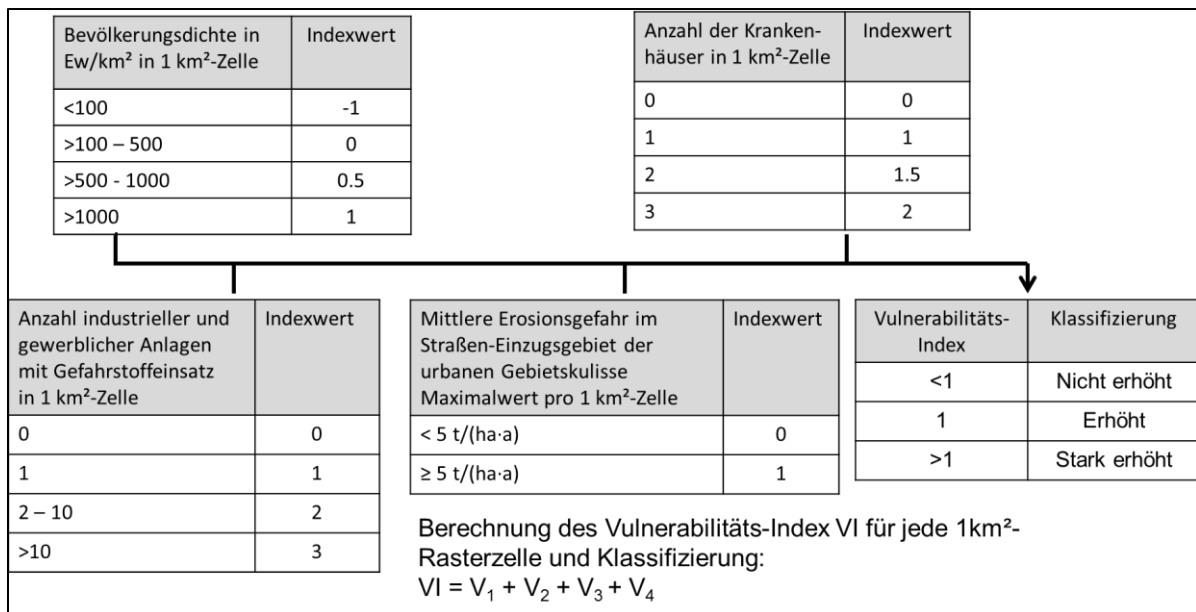


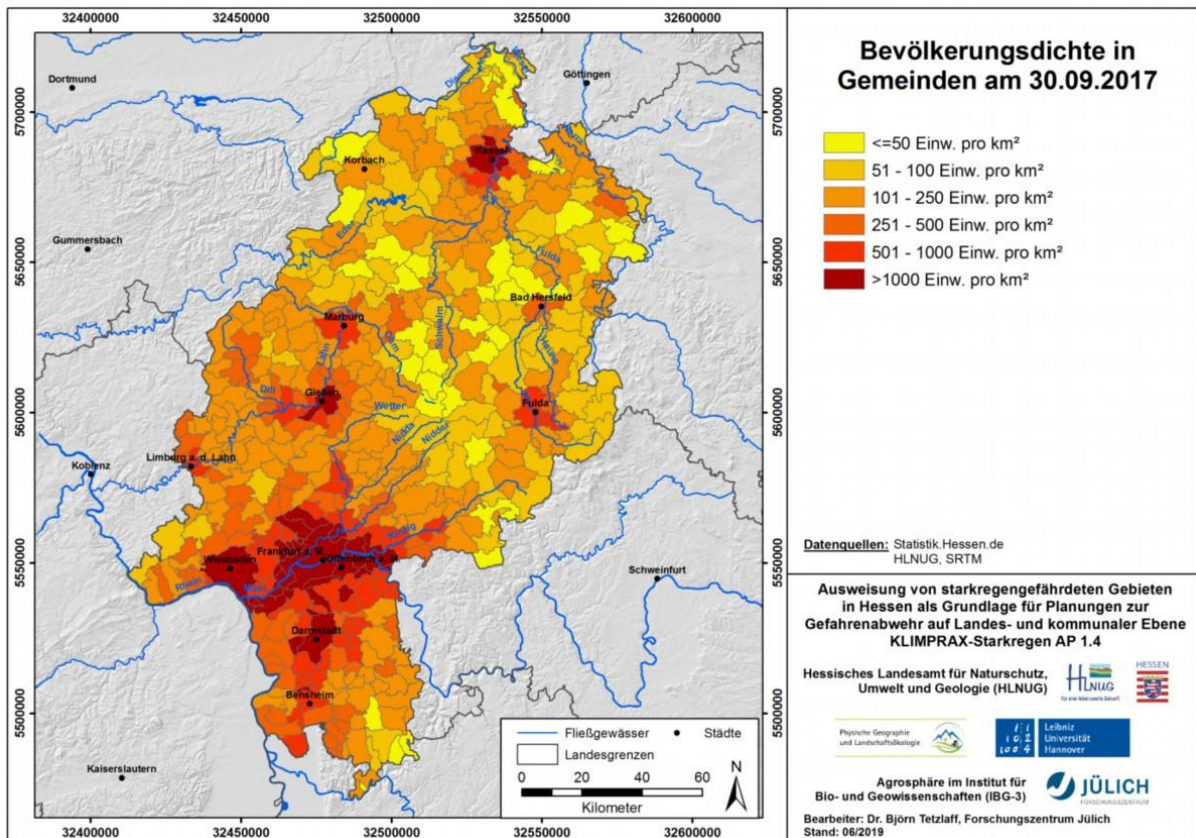
Abb. 19: Ableitung eines Vulnerabilitäts-Index für 1*1 km² Gitterzellen

5.2.1 Eingangsdaten

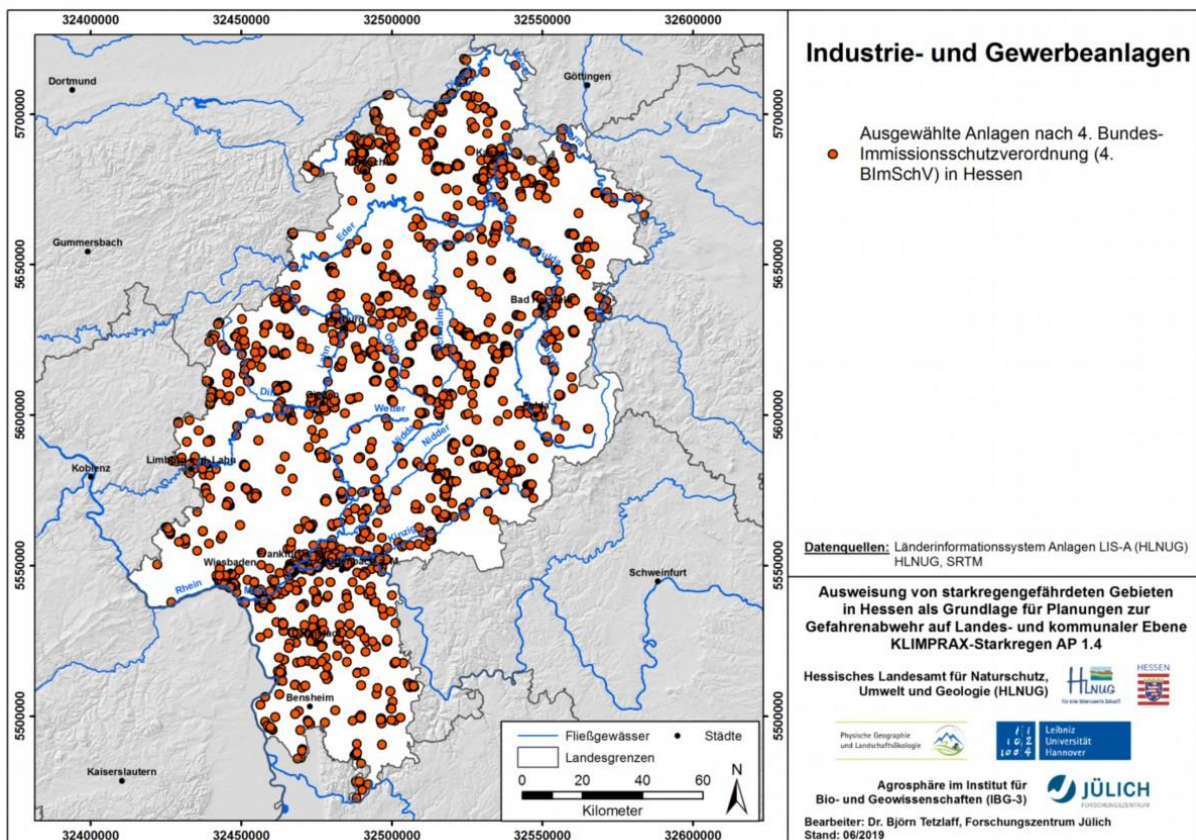
Die benötigten Eingangsdaten zeigt Tab. 11. Die Daten wurden für die Ableitung des Index aufbereitet und werden nachfolgend in Kartenform gezeigt (Karte 23 bis Karte 26).

Tab. 11: Benötigte Eingangsdaten für die Ableitung des Vulnerabilitäts-Index (VI)

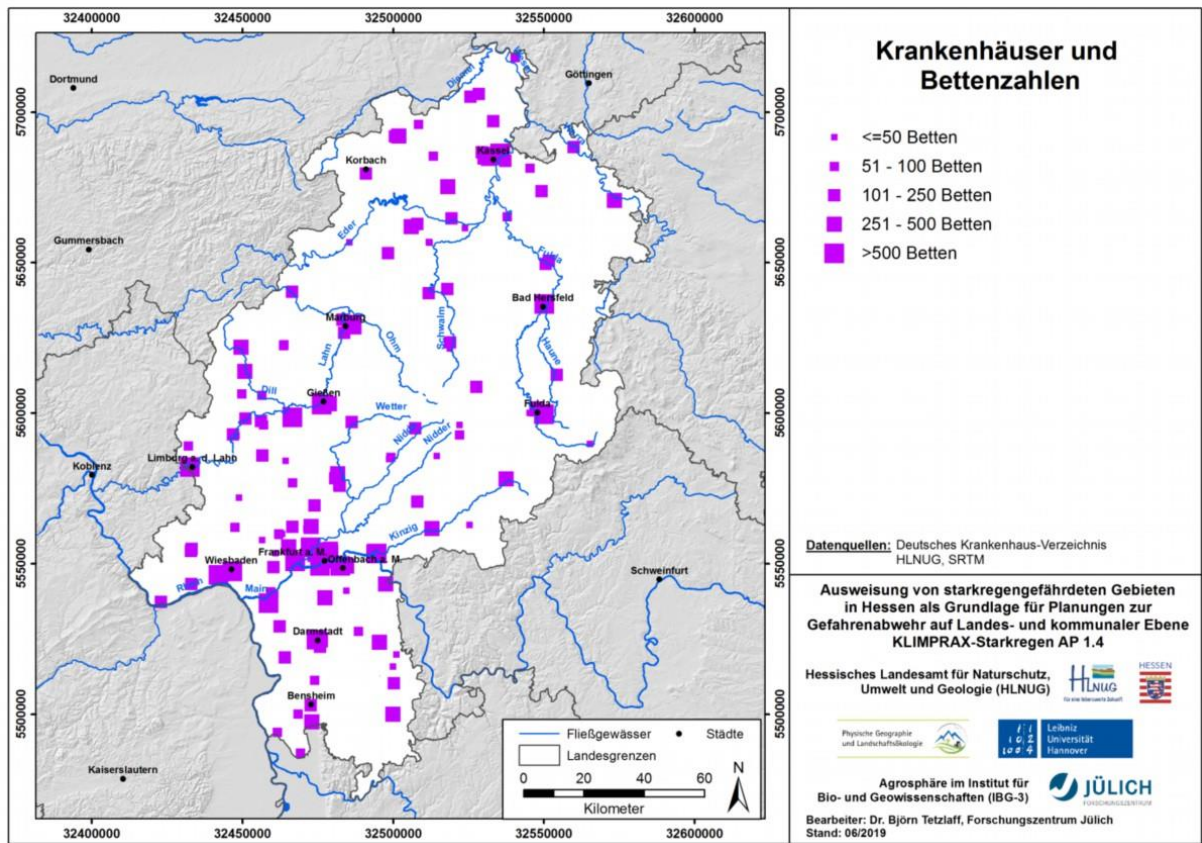
Eingangsdaten	Datenquelle	Parameter	Bereitsteller
Bevölkerungsdichte	Statistikdaten	Einwohnerzahl in Gemeinden 2017 pro km ²	Statistik.Hessen.de
Industrie- und Gewerbeanlagen	Länderinformationssystem Anlagen (LIS-A)	Standorte, Branchen (Gefahrstoff-Verwender, krit. Infrastruktur)	HLNUG
Krankenhäuser	Deutsches Krankenhaus-Verzeichnis	Standorte, Bettenzahl	Frei verfügbar
Bodenerosion	Erosionsatlas 2018 (HLNUG u. FZJ)	Mittlere Bodenabtragsgefahr mit 5*5 m ² Auflösung	vorhanden
Ortslagen	ATKIS		HVBG
Gitterzellen 1·1 km ²	Geogitter	1 km ²	BKG



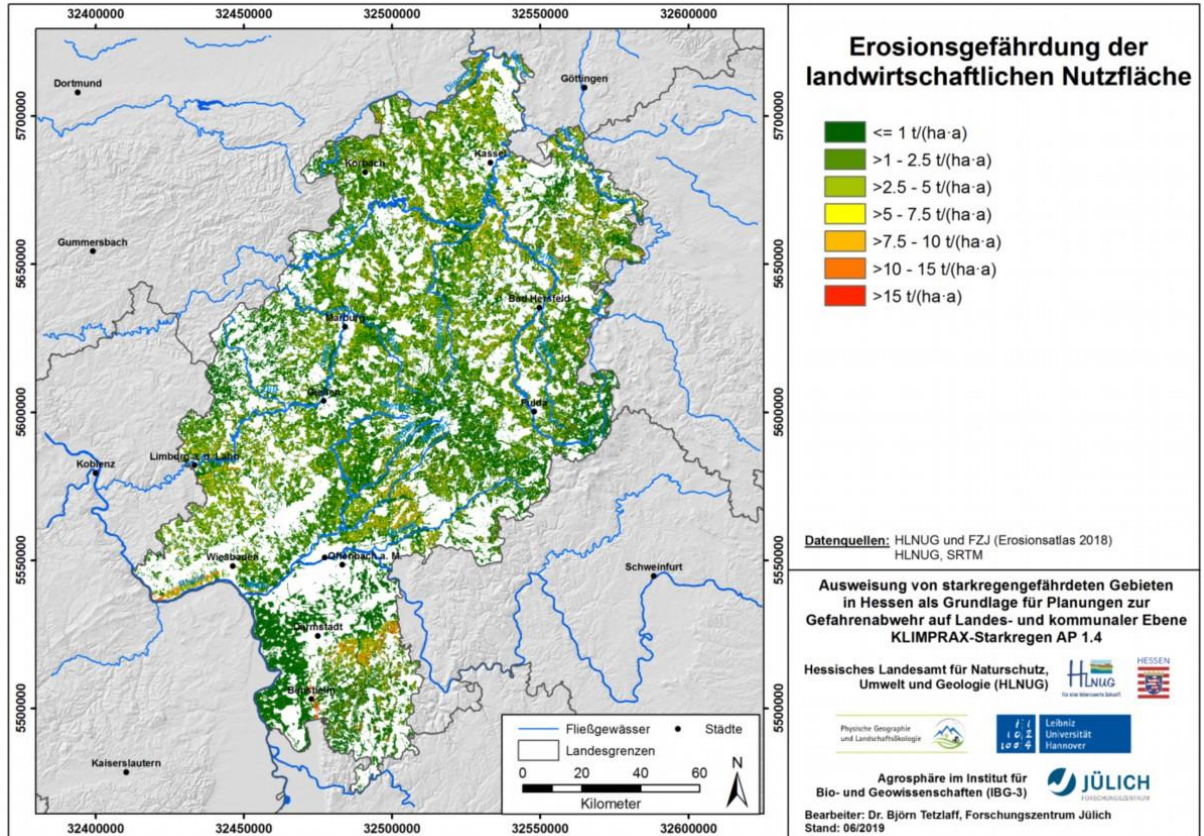
Karte 23: Bevölkerungsdichte 2017



Karte 24: Ausgewählte Industrie- und Gewerbeanlagen



Karte 25: Standorte von Krankenhäusern in Hessen 2018



Karte 26: Ergebnisse des Erosionsatlases Hessen 2018

Karte 23 zeigt die Bevölkerungsdichte in Hessen im Jahr 2017 auf Gemeindeebene. Im Mittel liegt die Dichte bei etwa 250 Einwohnern pro km², überdurchschnittliche Dichten von über 1000 Einwohnern pro km² sind für die Oberzentren Frankfurt, Offenbach, Wiesbaden, Darmstadt und Kassel typisch. In sehr ländlich geprägten Gemeinden am Vogelsberg sowie im Grenzgebiet zu Nordrhein-Westfalen ist die Dichte dagegen mit ca. 50 Einwohnern pro km² sehr niedrig.

Karte 24 zeigt die Standorte ausgewählter Industrie- und Gewerbeanlagen, die im Länderinformationssystem Anlagen (LIS-A) gespeichert sind. Übermittelt wurden 2506 Anlagen mit Datenstand 13.10.2018, die für die 4. Bundes-Immissionsschutzverordnung (4. BImSchV) in Hessen relevant sind. Von allen dort gespeicherten Anlagen wurden vom FZJ solche selektiert, deren Kennung nach Anhang 1 der 4. BImSchV darauf schließen lässt, dass mit Gefahrstoffen in größerem Umfang umgegangen wird. Die Anlagen sind über ganz Hessen verteilt, eine besonders hohe Dichte erreichen sie im Rhein-Main-Gebiet sowie in Teilen Nordhessens.

Karte 25 weist die Standorte von Krankenhäusern und deren Größe anhand der Bettenzahl aus. Auch diese Standorte sind über das gesamte Bundesland Hessen verteilt. Die Zahl der Krankenhäuser sowie ihre Größe nehmen mit der Einwohnerzahl zu, sodass in den Mittel- und Oberzentren verstärkt mehr und größere Kliniken zu finden sind.

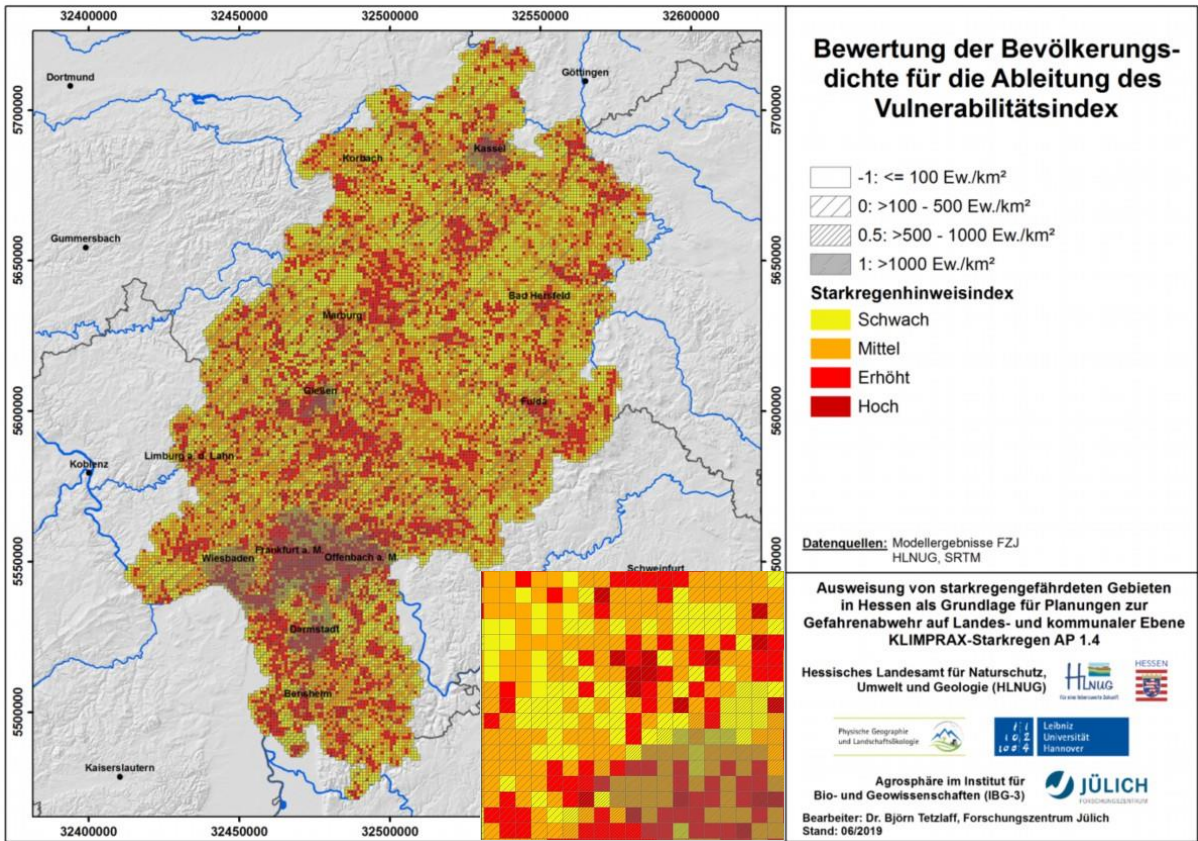
Karte 26 zeigt Ergebnisse aus dem Hessischen Erosionsatlas 2018, den das FZJ im Auftrag des HLNUG in einem separaten Projekt in zweiter Auflage erstellt hat (TETZLAFF et al. 2013, FRIEDRICH et al. 2019). In der Karte ist die mittlere Bodenabtragsgefahr durch Wasser zu sehen, die sich aus dem Zusammenspiel von Starkregen, Bodeneigenschaften, Reliefverhältnissen und den Fruchtfolgen der angebauten landwirtschaftlichen Kulturen ergibt. Während der Erosionsmittelwert in Hessen bei ca. 2 t/(ha·a) liegt, werden Erosionsschwerpunkte mit stark überdurchschnittlichen Bodenabtragsgefahren für die Wetterau, den Rheingau, das Einzugsgebiet der Gersprenz sowie Teile des Lahn-Dill-Berglands ausgewiesen.

5.2.2 Ableitung des Vulnerabilitäts-Index

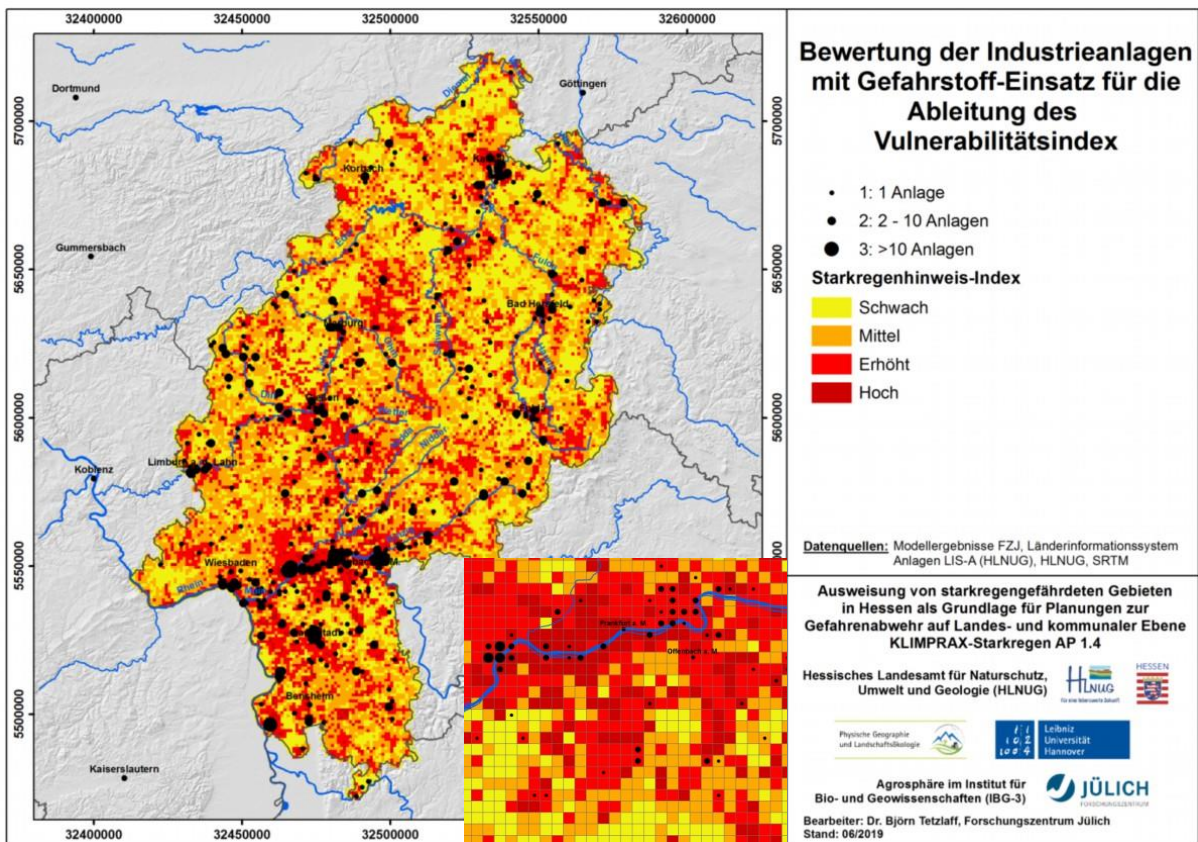
Die Ableitung des Vulnerabilitäts-Index erfolgt in ähnlicher Weise wie die des Starkregenhinweis-Indexes. Die in Karte 23 bis Karte 26 gezeigten Eingangsdaten werden gemäß den Angaben in Abb. 19 mit dem Geogitter (Tab. 11) überlagert und der Mittelwert bzw. die Anzahl ausgewertet.

Die nachfolgenden Karten zeigen die klassifizierten Ergebnisse dieses Bearbeitungsschritts. Da in Abstimmung mit dem Auftraggeber der Vulnerabilitäts-Index keine eigene Karte begründet, sondern als zusätzliche Informationsebene zum Starkregenhinweis-Index dient, werden die Ergebnisse durch Schraffuren bzw. Punktsymbole dargestellt, die die Ergebnisse zum Starkregenhinweis-Index überlagern.

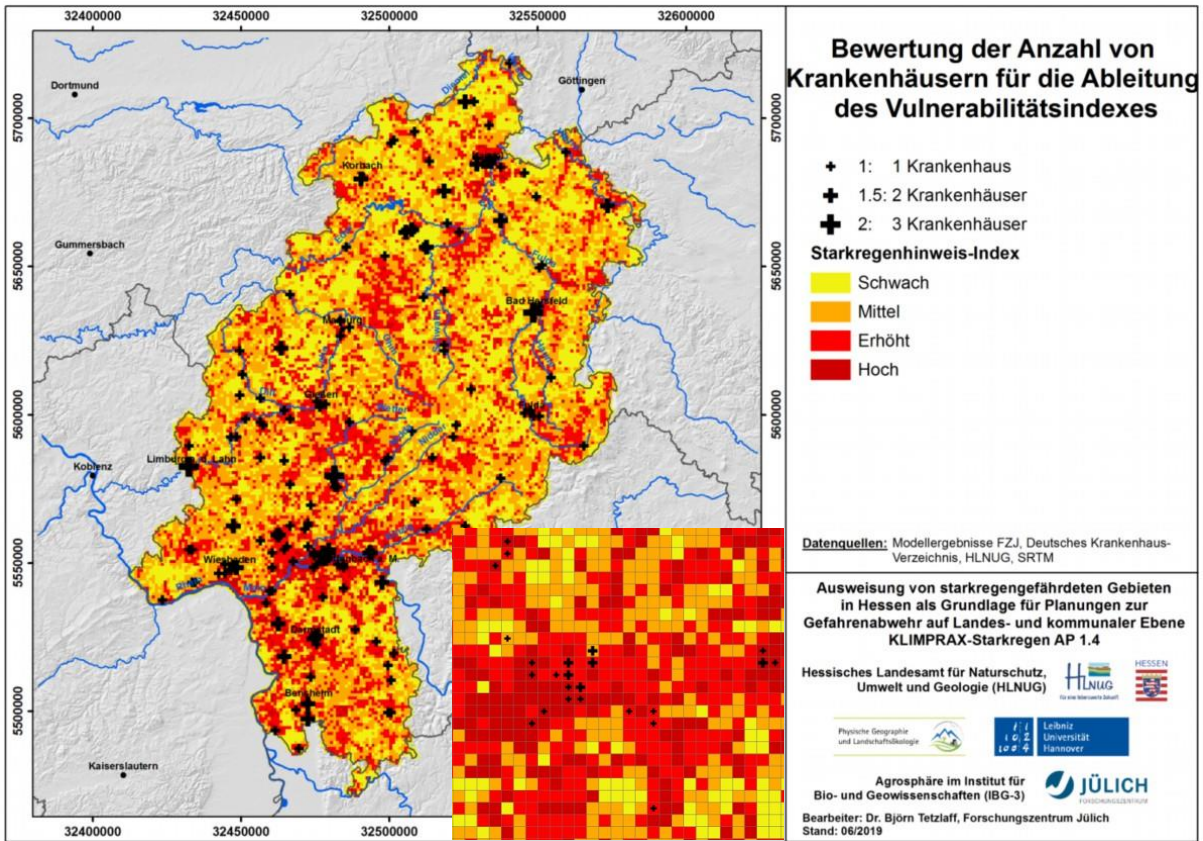
Für die Veröffentlichung der Endergebnisse dieses Projekts wird eine digitale Darstellungsform befürwortet, die verschiedene Informationsschichten beinhaltet, die sich je nach Bedarf des Benutzers ein- und ausschalten lassen. Mittels eines Internetviewers analog zum Bodenviewer des HLNUG oder exportierter ArcGIS-Karten im Format pdf erscheint dies technisch realisierbar.



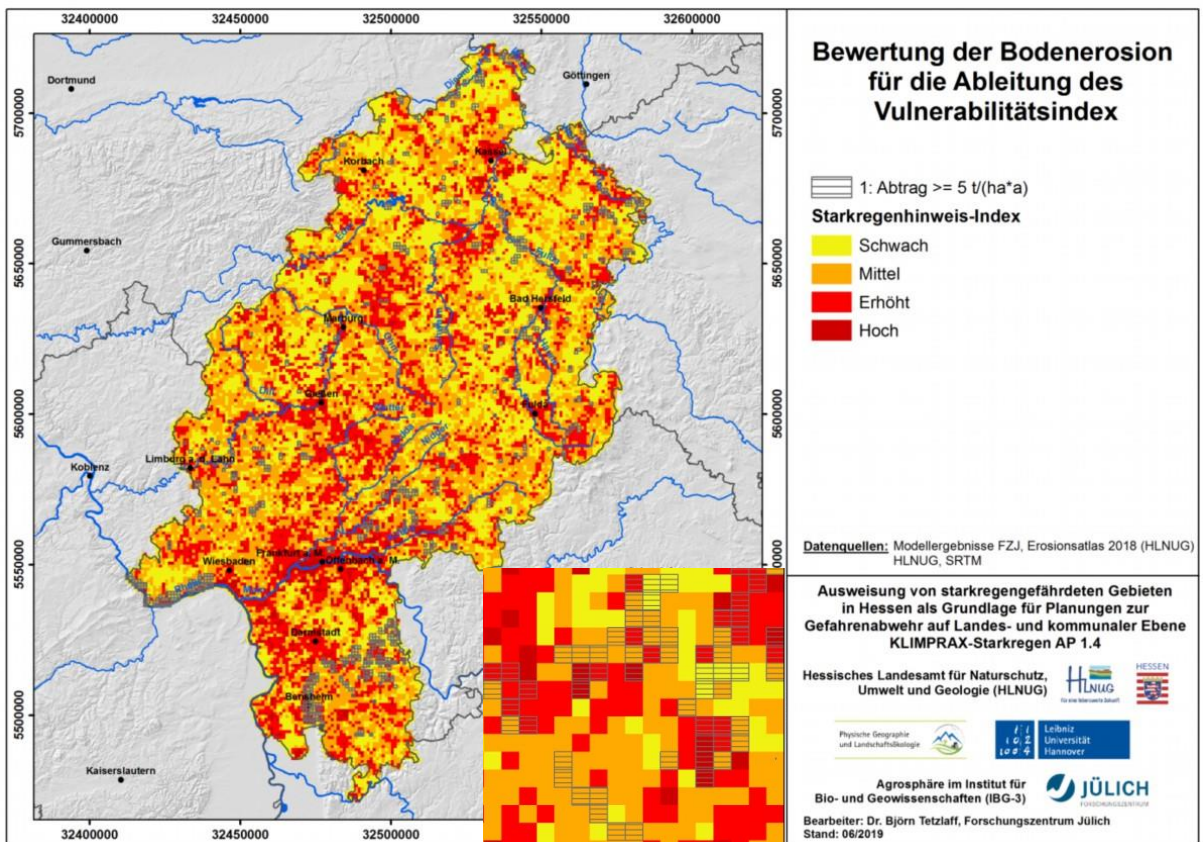
Karte 27: Bewertung der Bevölkerungsdichte



Karte 28: Bewertung der Industrieanlagen nach BImSchV



Karte 29: Bewertung der Zahl der Krankenhäuser

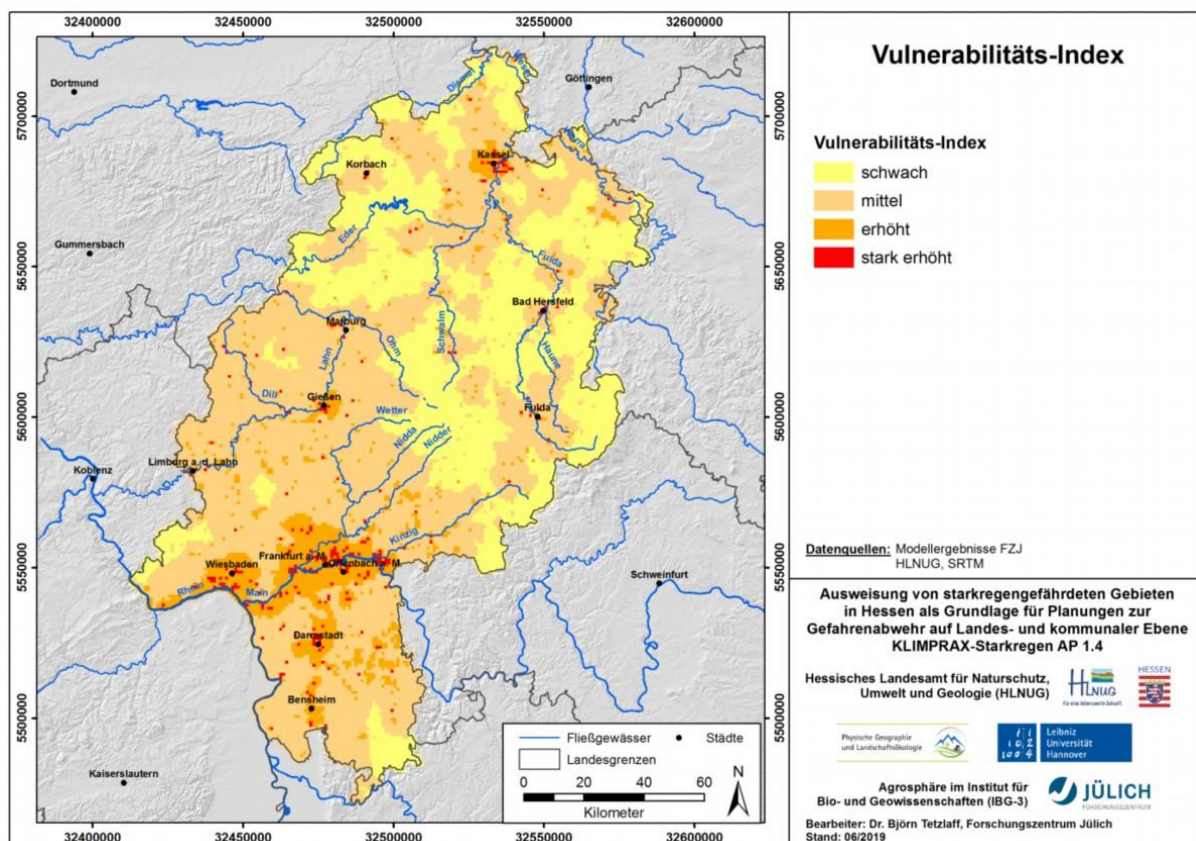


Karte 30: Bewertung der Erosionsgefahr

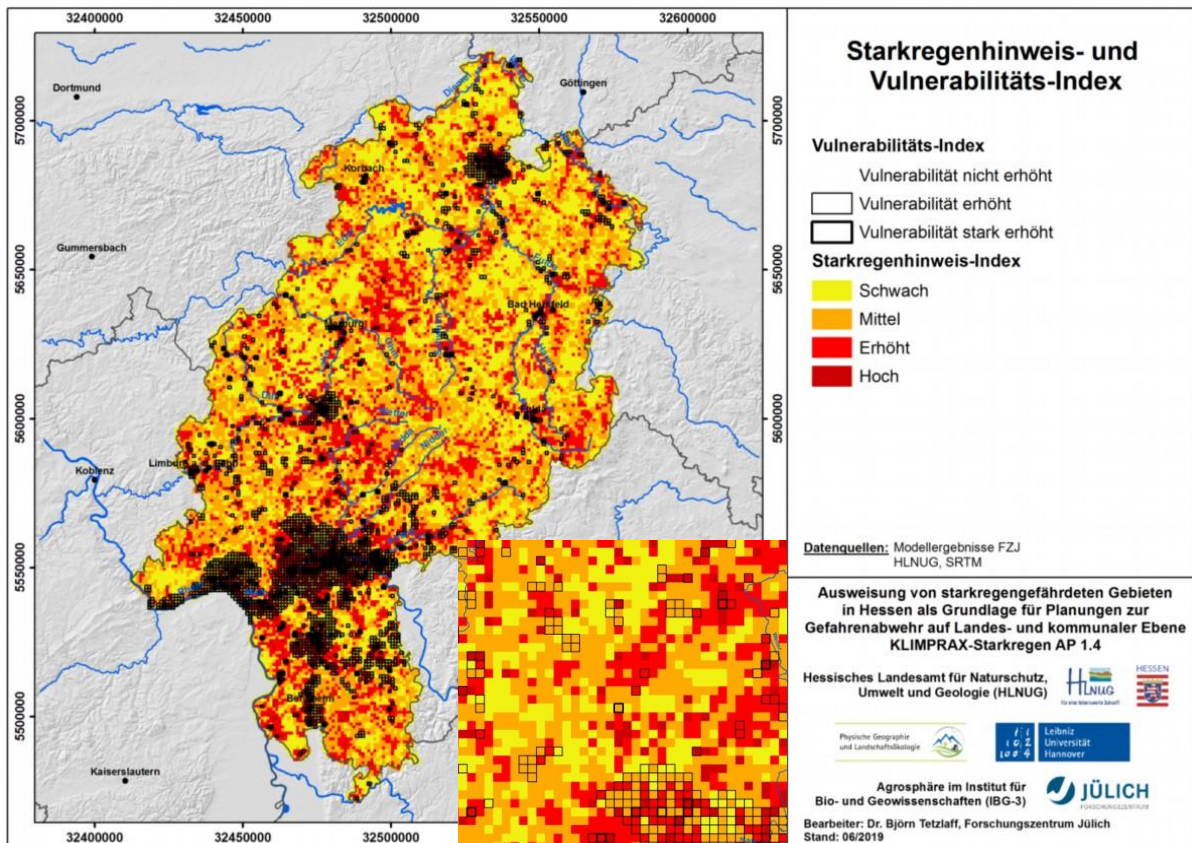
Karte 27 bis Karte 30 zeigen die Ergebnisse der Klassifizierung der Eingangsdaten sowohl für Hessen als auch für vergrößerte Ausschnitte, um die Wirkung der gewählten Schraffuren und Punktsymbole zu verdeutlichen. Die Karten bestätigen die bereits in Kapitel 5.2.1 gemachten Aussagen zu den räumlichen Verteilungsmustern und präzisieren diese aufgrund der Klassifikation. Daher wird an dieser Stelle auf Kapitel 5.2.1 verwiesen. Für jede in der Karte dargestellte Klasse wird auch der Indexwert abgebildet, der sich gemäß Abb. 19 zum Vulnerabilitäts-Index aufsummiert.

5.2.3 Ergebnisse

Das Ergebnis der Berechnung des Vulnerabilitäts-Indexes ist in Karte 31 zu sehen. Der Index variiert zwischen den Klassen „schwach“ und „stark erhöht“, wobei sich die beiden höchsten Klassen „erhöht“ und „stark erhöht“ räumlich scharf abgrenzen. Diese Vulnerabilitäten sind für die Oberzentren und einige Mittelzentren charakteristisch (Kassel, Gießen, Rhein-Main-Gebiet, Darmstadt und Bensheim). In Marburg, Limburg, Bad Hersfeld und Fulda ist die Dichte hoher Vulnerabilitäts-Indices bereits deutlich niedriger. Ursache für die beschriebene Verteilung ist das regional differenzierte Zusammenspiel der Einzelkomponenten Bevölkerungsdichte, Industriedichte, Krankenhausedichte und Erosionsgefahr. Das Grundmuster des Vulnerabilitäts-Indexes folgt der räumlichen Verteilung der Bevölkerungsdichten (Karte 23, Karte 27). Für eine Überprägung, sowohl verstärkend als auch abschwächend, sorgen v.a. die Dichte der Industrieanlagen, die Anzahl der Krankenhäuser, aber auch die Erosionsgefährdung. Letztere erklärt die höhere Vulnerabilität nördlich von Bensheim im Vergleich zu Marburg, trotz ähnlicher Bevölkerungsdichten in diesen Räumen.



Karte 31: Vulnerabilitäts-Index



Karte 32: Starkregenhinweis-Index und überlagerter Vulnerabilitäts-Index

Karte 32 zeigt abschließend den Starkregenhinweis-Index mit dem in Form quadratischer Punktsymbole überlagerten Vulnerabilitäts-Index. Hohe Gefährdungen durch Starkregen im urbanen Raum und gleichzeitig hohe Vulnerabilitäten ergeben sich demnach großflächig im gesamten Rhein-Main-Gebiet aber auch in allen Ober- und Mittelzentren. Darüber hinaus werden jedoch auch zahlreiche kleinräumige Gebiete ausgewiesen, in denen erhöhte Indices zusammentreffen, z.B. in den Räumen Fritzlar-Melsungen, Eschwege, Lahn-Dill, Wetterau sowie nördlich des Odenwaldes.

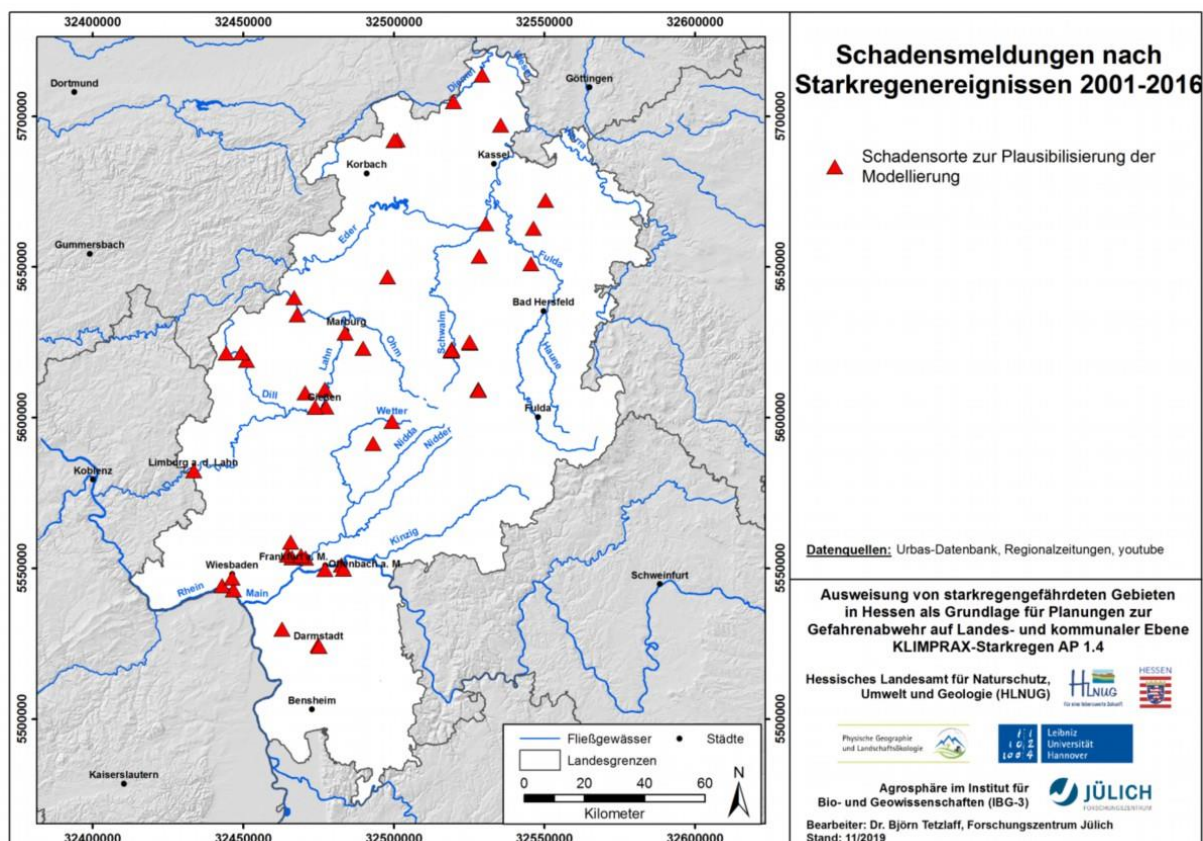
5.3 Plausibilisierung des Starkregenhinweis-Index

Nachfolgend sollen die modellierten Ergebnisse zum Starkregenhinweis-Index auf Plausibilität geprüft werden. Da Messwerte nicht zur Verfügung stehen, werden dokumentierte Schadensereignisse infolge von Starkregen in Hessen im Zeitraum 2001-2016 ausgewertet. Der Vulnerabilitätsindex kann nicht anhand von Schadensberichten überprüft werden, da diese nicht detailliert genug sind, um Anhaltspunkte abzuleiten, dass ein Schaden geringer gewesen wäre, wenn im betroffenen Gebiet eine geringere Bevölkerungsdichte, keine Industrieanlagen etc. vorhanden gewesen wären.

Die Berichte über Starkregenereignisse und die von ihnen verursachten Schäden stammen aus der Datenbank „URBAS“, die im Rahmen des BMBF-Förderprogramms „Risikomanagement extremer Hochwasserereignisse - Vorhersage und Management von Sturzfluten in urbanen Gebieten“ erstellt wurde und in der zahlreiche Hinweise auf Ereignisse in Hessen gefunden wurden (www.urbanesturzfluten.de). Darüber hinaus konnten Ereignisse in den regionalen Tageszeitungen

recherchiert werden, die über die Internetseiten der Verlage zugänglich sind (u.a. HNA), über regionale Fernsehprogramme, deren Reportagen bei youtube.com hochgeladen wurden sowie über Arbeiten des HLNUG (MENK & LÖNS-HANNA 2011). Insgesamt konnten über 50 Ereignisse recherchiert werden, von denen 46 aufgrund eindeutiger Angaben zum Schadensort georeferenzierbar waren. Dies war Voraussetzung, um einen Abgleich mit den in dieser Arbeit erstellten Indizes sowie weiteren Geodaten durchführen zu können. Karte 33 zeigt die Lage der Schadensorte in Hessen. Alle Landesteile werden abgebildet, wobei das Rhein-Main-Gebiet und das Lahn-Dill-Gebiet vergleichsweise intensiver erfasst sind. Tab. 12 benennt die Schadensorte und vergleicht die Detailinformationen mit den RADKLIM-Daten sowie den Indexwerten.

Man erkennt eine vorwiegend gute Übereinstimmung zwischen den Gebieten der Schadensereignisse und den Niederschlagscharakteristika aus RADKLIM. In den meisten Fällen lassen sich Starkniederschläge der Dauerstufen D15 und D60 zu den in den Berichten genannten Tagen und Uhrzeiten finden. Der Grad an Übereinstimmung steigt mit der räumlichen Ausdehnung der Niederschläge. Umgekehrt lassen sich zu kleinräumigen Starkniederschlägen weniger oder keine Starkniederschläge in RADKLIM finden. Beispiele hierfür sind das Ereignis mit der ID 4 in Immenhausen-Holzhausen oder die vom HLNUG an Ombrometerdaten ermittelten Starkniederschläge in Nord- und Mittelhessen (ID 44-46).



Karte 33: Standorte der recherchierten Starkregenereignisse und Schadensmeldungen

Tab. 12: Recherchierte Starkregenereignisse und Schadensmeldungen in Hessen für Plausibilisierungszwecke

ID	Datum	Ort	Schaden	Quelle	Starkregenhinweis-Index	Niederschlagscharakteristik lt. RADKLIM
1	05.06.2011	Berfa	Keller geflutet, Schlammlawine, Straßen unterspült, Millionenschaden; in Berfa überschwemmte eine bis zu 80 Meter breite Schlammlawine die Innenstadt	urbas	erhöht	D60-3
2	29.06.2011	Homburg (Efze)	Keller geflutet	urbas	erhöht	D60-1
3	10.08.2009	Alsfeld	Keller überflutet; Geschäfte beschädigt; Öffentliche Gebäude beschädigt; Straßen überflutet; Stromleitungen beschädigt; Behinderungen des Straßenverkehrs	urbas	erhöht	D60-3
4	10.08.2009	Immenhausen: Holzhausen	Keller überflutet; Straßen überflutet; Stromleitungen beschädigt; Behinderungen des Straßenverkehrs	urbas	gering	kein
6	10.08.2009	Frankfurt a. M.: Sachsenhausen	Keller überflutet; Geschäfte beschädigt; Öffentliche Gebäude beschädigt; Wasser im Keller des Polizeireviers, Zellen dort nicht benutzbar; Unterführungen überflutet; Straßen überflutet; Stromleitungen beschädigt; Behinderungen des Straßenverkehrs	urbas	erhöht-hoch	kein
7	10.08.2009	Offenbach am Main	Auf der zentralen Mainstraße nach Starkregen: Hier stand auf mehreren hundert Metern das Wasser bis zu 50 Zentimeter hoch, der Verkehr kam zum Erliegen.	urbas, SPON	erhöht-hoch	D60-1
8	05.09.2011	Biedenkopf	Straßen überflutet	urbas	erhöht-hoch	D60-1
9	05.09.2011	Gemeinde Dautphetal	Straßen überflutet	urbas	mittel-erhöht	kein
10	24.08.2011	Hungen	Straßen überflutet	urbas	erhöht-hoch	kein

ID	Datum	Ort	Schaden	Quelle	Starkregenhinweis-Index	Niederschlagscharakteristik lt. RADKLIM
11	24.08.2011	Biebertal	Straßen überflutet	urbas	erhöht-hoch	kein
12	24.08.2011	Gemünden	Straßen überflutet	urbas	erhöht-hoch	kein
13	24.08.2011	Laubach	Straßen überflutet	urbas	erhöht-hoch	kein
14	26.08.2011	Raum Darmstadt	Keller überflutet; Straßen nicht befahrbar wegen Wasser und Schlamm	urbas	erhöht	D60-1
15	23.08.2011	Berfa	Straßen überflutet, Auf der Straße von Ottrau nach Berfa floss Schlamm in das Dorf.	urbas	erhöht	D15-1, D60-1
16	23.08.2011	Alsfeld	Die Seniorenresidenz des DRK in den Erlen stand vollständig unter Wasser.	urbas	mittel	kein
17	23.08.2011	Alsfeld	In Alsfeld wurden durch den Starkregen und Hagel zahlreiche Straßen überflutet.	urbas	erhöht	kein
18	05.06.2011	Alsfeld	Keller überflutet; Schlammlawine	urbas	erhöht	D60-3
19	24.07.2013	Lauterbach	Keller, Straßen, Unterführungen überflutet	urbas	mittel	kein
20	20.06.2013	Lauterbach	Bäume entwurzelt, Straßen überflutet	Fuldaer Zeitung	Stadtzentrum erhöht, Umgebung das gesamte Spektrum	D 60-1
21	22.05.2007	Osthessen	Keller, Straßen geflutet, Behinderungen des Straßenverkehrs	urbas	Lage unklar	unklar
22	10.08.2007	Nord- und Mittelhessen	Straßen überflutet	urbas	Lage unklar	unklar
23	08.06.2003	Hessen	Straßen überflutet	Urbas	Lage unklar	unklar
24	20.01.2005	Mittelhessen	Straßen überflutet	Urbas	Lage unklar	unklar
25	25.06.2006	Wiesbaden	Straßen überflutet, Kanaldeckel hochgedrückt	urbas	erhöht-hoch	D15-1
26	25.06.2006	Gießen	Dach von Forschungseinrichtung wegen großer Wassermassen eingebrochen und Forschungsarbeiten zerstört	urbas	Lage unklar	kein

ID	Datum	Ort	Schaden	Quelle	Starkregenhinweis-Index	Niederschlagscharakteristik lt. RADKLIM
27	05.06.2016	Bad Arolsen	Überschwemmung der Bahnhofstraße	HNA, Youtube: https://www.youtube.com/watch?v=WjvaaZh7IEQ	mittel,erhöht,hoch	D 60-1
28	30.04.2014	Bad Arolsen	Über 20 Keller in Bad Arolsen vollgelaufen	HNA, pdf	mittel,erhöht,hoch	kein
29	28.05.2016	Liebenau	Schlammlawine	HNA, Youtube: https://www.youtube.com/watch?v=xEEEx-Fv9q_Y	mittel	D 60-2
30	22.07.2006	Darmstadt und Umgebung	Straßen überflutet	urbas	erhöht-hoch	D 60-1
31	05.07.2006	Limburg / Lahn	Unwetter mit starken Regenfällen und Sturmböen	Keller überflutet	erhöht-hoch	kein
32	28.07.2006	Gemeinden Wettenberg	Gebäude beschädigt	urbas	im Zentrum erhöht, teilweise mittel und hoch	D 15-1
33	28.07.2006	Gemeinden Heuchelheim	Gebäude beschädigt	urbas	im Zentrum erhöht, teilweise mittel und hoch	D 15-1
34	06.08.2013	Südhessen, Rhein-Main-Gebiet	Keller + Straßen überflutet	urbas	Lage unklar	kein
35	10.06.2010	Offenbach am Main	Keller + Straßen überflutet	urbas	erhöht-hoch	kein
36	11.06.2010	Ebsdorfergrund, OT Wittelsberg	Keller + Straßen überflutet	urbas	hoch im Ortsteil Wittelsberg, sonst das gesamte Spektrum	D15-1
37	10.06.2007	Frankfurt	Frankfurt: Anschlussstelle zur A66 1 m unter Wasser.	urbas	erhöht-hoch	D 60-1

ID	Datum	Ort	Schaden	Quelle	Starkregenhinweis-Index	Niederschlagscharakteristik lt. RADKLIM
38	10.06.2007	Sulzbach (Taunus)	Zubringer zur A66 in Sulzbach wegen Überflutung 6 Stunden gesperrt.	urbas	erhöht	D 60-3
39	10.06.2007	Bad Soden am Taunus	Straßen überflutet	urbas	erhöht-hoch	D 60-1
40	10.06.2007	Eschborn	Straßen überflutet	urbas	erhöht-hoch	D 60-3
41	10.06.2007	Groß-Gerau	Straßen überflutet	urbas	erhöht-hoch	kein
42	10.06.2007	Kronberg im Taunus	Straßen überflutet	urbas	erhöht	kein
43	21.08.2007	Trendelburg	Straßen überflutet	urbas	erhöht-hoch	kein
44	11.09.2011	Hessisch-Lichtenau	Straßen überflutet	Menk u.Löns-Hanna 2011	erhöht	kein
45	11.09.2011	Spangenberg	Straßen überflutet	Menk u.Löns-Hanna 2011	mittel-erhöht	kein
46	11.09.2011	Marburg	Straßen überflutet	Menk u.Löns-Hanna 2011	erhöht-hoch	kein
47	17.09.2006	Dillenburg-Niederschelden	Überflutungen, unterspülte Straßen	Youtube: https://www.youtube.com/watch?v=0NuL5N_Viv0	mittel-erhöht-hoch	D 60-1
48	17./18.09.2006	Dillenburg und LK Lahn-Dill	Überflutungen, Schlamm, Stromausfall, überflutetes Umspannwerk, Trafostationen, Verteilerkästen; Produktionsstillstand im Edelstahlwerk; Trinkwasserverschmutzung	https://rp-online.de/panorama/deutschland/unwetterkatastrophe-in-hessen-und-nrw_aid-17323143	erhöht-hoch	D 60-2

ID	Datum	Ort	Schaden	Quelle	Starkregenhinweis-Index	Niederschlagscharakteristik lt. RADKLIM
49	17./18.09.2006	Haiger	Einige Häuser standen meterhoch unter Wasser, berichtete der Bürgermeister von Haiger, Gerhard Zoubek: "Das war unglaublich." Die Flut habe Brücken und komplette Straßen weggeschwemmt: "Die Feuerwehr kam zeitweise selbst mit schweren Fahrzeugen nicht mehr durch."	https://rp-online.de/panorama/deutschland/unwetterkatastrophe-in-hessen-und-nrw_aid-17323143	hoch	D 60-1
50	05.06.2011	Felsberg	Straße gesperrt, da bis 50 cm geflutet	2011_HNA_pdf	hoch	D 60-1
51	19.09.2014	Sterkelshausen (Gemeinde Alheim)	Wasser schoss von zwei 2 Seiten ins Dorf	https://www.youtube.com/watch?v=3GNqOi2i244	mittel	D 60-2
52	29.07.2014	Wiesbaden, bes. Gewerbegebiet Biebrich	überflutete Straßen	http://www.wiesbadenaktuell.de/startseite/news-detail-view/article/schwuele-luft-bescherte-zwei-unwetterueber-wiesbaden.html	erhöht-hoch	D 15-1 bis D 60-1
53	29.07.2014	Wiesbaden, Schierstein	überflutete Straßen	http://www.wiesbadenaktuell.de/startseite/news-detail-view/article/schwuele-luft-bescherte-zwei-unwetterueber-wiesbaden.html	erhöht-hoch	D 15-1 bis D 60-1

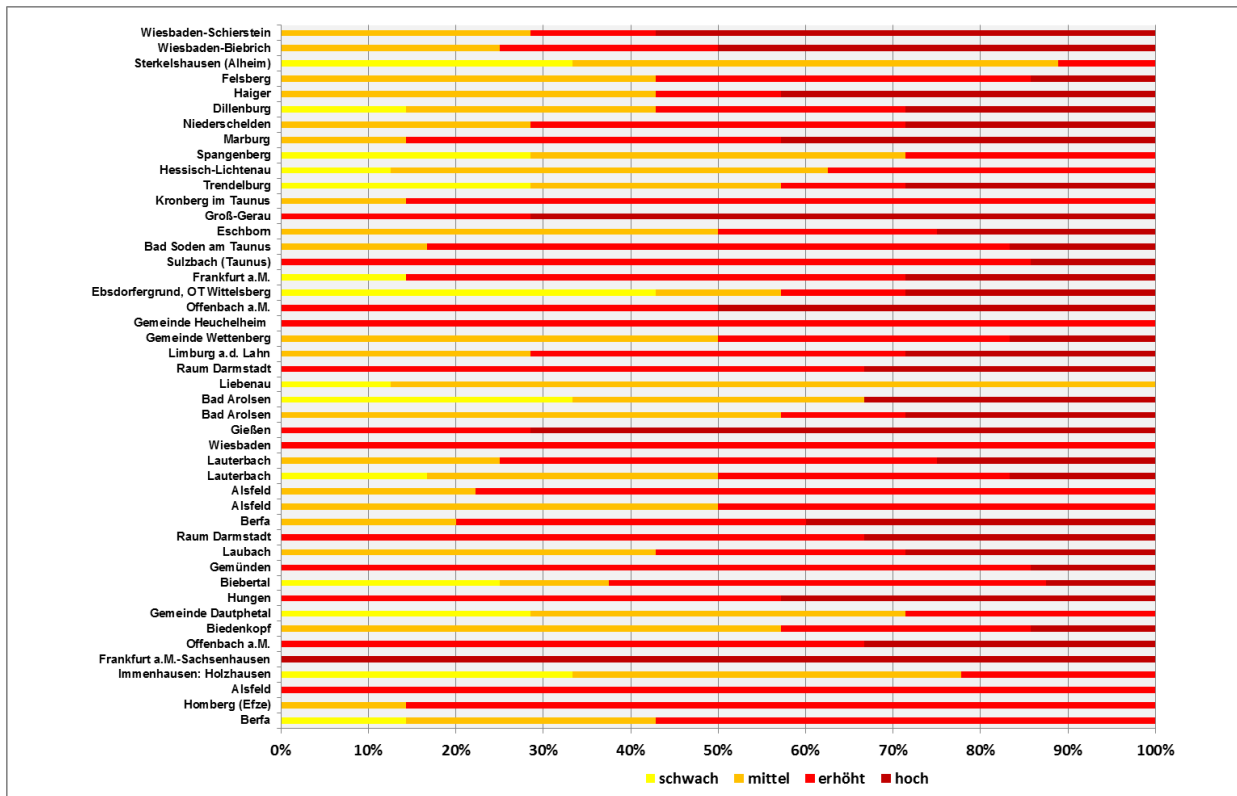


Abb. 20: Verteilung der Klassen des Starkregengefährdungs-Index im Umfeld der Schadensorte nach Tab. 12

Auffallend sind auch die zahlreichen Übereinstimmungen mit den Klassen „erhöht“ bzw. „hoch“ des ohne Kenntnis dieser Schadensmeldungen ermittelten Starkregenhinweis-Index. Abb. 20 verdeutlicht die gute Übereinstimmung in räumlicher Dimension. Hierzu wurden mittels GIS alle Gitterzellen des Starkregenhinweis-Index in einem Radius von 1,5 km um den gemeldeten Schadensort herum ausgewertet, d.h., die Zelle selbst und alle acht benachbarten 1 km² großen Zellen. Man erkennt, dass in fast allen Gebieten Indizes der beiden höchsten Klassen erfasst werden. Eine Ausnahme bildet das Ereignis in Liebenau (ID 29), das i.W. zu einer Schlammlawine auf der Durchgangsstraße geführt hat. Maßgeblich hierfür war jedoch weniger die konkrete Starkregenhöhe als vielmehr starker Hagelfall, der die Kanalisation verstopfte, sodass nachfolgender Regenabfluss zurückgestaut wurde und seinen Weg durch Gehölzstreifen und Gärten genommen hat. Dies zeigt auch, dass Schlammlawinen nicht unbedingt auf Ackerflächen mit hohem Erosionsrisiko zurückgehen müssen, sondern dass eine Vielzahl von Sedimentquellen auch im nicht-landwirtschaftlichen Bereich bei Starkregen aktiv werden kann. Insgesamt kann festgestellt werden, dass die Güte des Starkregenhinweis-Index hoch genug ist, um Gebiete zu identifizieren, in denen es zu hohen Schäden oder Verkehrsbehinderungen kommen kann. Die Starkregen-Hinweiskarten bieten damit eine landesweite Übersicht über Gebiete mit erhöhtem Auftreten von Starkregen in versiegelten Gebieten im Zeitraum 2001-2016 und gleichzeitig reliefbedingter Überflutungsgefahr. Starkregen-Hinweiskarten und Vulnerabilitätskarten erlauben eine Priorisierung der von Starkregen potenziell stärker betroffenen Regionen in Hessen und damit eine zielgerichtete Planung von räumlich höher aufgelösten Detailstudien. Allerdings können die Karten nicht dazu benutzt werden, quantitative Rückschlüsse auf Gefahren durch kritische Überflutungshöhen oder auf konkreten Bedarf an Hilfeleistung im Überflutungsfall zu ziehen.

6 Projektbaustein 5 – Entwicklung und Anwendung einer Methodik zur Ableitung des R-Faktors auf Basis der Radarklimatologie

6.1 Hintergrund und Stand der Forschung

Der R-Faktor als Maß für die Erosivität des Niederschlags ist eine wichtige Eingangsgröße zur Abschätzung der Bodenerosion durch Wasser mit der Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung (ABAG). Die Regenerosivität kann basierend auf dem dokumentierten Zusammenhang von Höhe des Bodenabtrags und kinetischer Energie des Niederschlags unmittelbar aus zeitlich hochauflösenden Zeitreihen des Niederschlags abgeleitet werden (SCHWERTMANN et al. 1990, DIN 19708). In der Vergangenheit wurden dafür punktuell vorliegende Daten von Niederschlagsschreibern oder Ombrometern verwendet. Auf Grund der geringen räumlichen Ausdehnung konvektiver Niederschlagszellen sowie einer hohen Variabilität der Niederschlagsintensität innerhalb dieser Zellen, die insbesondere in den Sommermonaten einen erheblichen Anteil zur Niederschlagserosivität beitragen, ist die räumliche Erfassung der Regenerosivität jedoch unvollständig und lückenhaft (FISCHER et al. 2016).

In der Praxis werden R-Faktoren zudem häufig mittels Regressionsgleichungen aus interpolierten Sommer- oder Jahresniederschlagssummen ermittelt, um eine Übertragung in die Fläche zu erreichen. Bei Verwendung dieser Methodik bleiben hohe R-Faktoren oftmals auf Bergkuppen begrenzt, während das tatsächliche Auftreten von Starkregen als Folge von konvektiven Ereignissen im Flachland, z. B. der Wetterau, keine Berücksichtigung finden (TETZLAFF et al. 2013). Die verwendeten Regressionsgleichungen wurden zudem üblicherweise anhand von Daten weniger Niederschlagsschreiber (i.d.R. < 20) ermittelt und werden nur selten oder in vielen Bundesländern überhaupt nicht aktualisiert. Zahlreiche Studien deuten jedoch auf räumliche und zeitliche Veränderungen der Niederschlagsverteilung und -mengen sowie auf eine Zunahme und Intensivierung von Starkregen und somit auch auf eine Zunahme der Niederschlagserosivität im Zuge des Klimawandels hin (AUERSWALD et al. 2019, BURT et al. 2016). Entsprechend ist für aktuelle Ableitungen zudem die Repräsentativität der Regressionsgleichungen zu hinterfragen, die basierend auf Niederschlagsdaten der letzten Klimaperiode oder noch älteren Daten ermittelt wurden. Die Ableitung des R-Faktors für das hessische Fachinformationssystem „Erosionsatlas Hessen“ basiert aktuell auf der Verwendung einer Regressionsgleichung. Bei den verwendeten Niederschlagsdaten handelt es sich um interpolierte mittlere Sommerniederschlagssummen der Monate Mai bis Oktober für den Zeitraum 1971 – 2000 in einem $1 * 1$ km Raster (HLNUG o. J.). Sowohl die Niederschlagsdaten zur Ermittlung der Korrelation zwischen R-Faktor und Niederschlagssumme als auch die Daten zur R-Faktor Berechnung mittels dieser Regressionsgleichung stammen folglich aus der Zeit vor dem Jahr 2001.

Mit der im Jahr 2001 beginnenden Radarklimatologie steht nun erstmals ein räumlich und zeitlich hoch aufgelöster Niederschlagsdatensatz für Deutschland zur Verfügung, welcher durch die mit Ausnahme einiger Fehlzeiten (Kap. 3.1.1) lückenlose Erfassung aller Niederschlagsereignisse ideale Voraussetzungen zur Ableitung des R-Faktors bietet. Allerdings sind die Unterschiede insbesondere in der Erfassung von Starkregen zwischen Radar und Ombrometer bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen. Wie in Kapitel 3 aufgezeigt, sind die Niederschlagssummen in der Radarklimatologie tendenziell etwas geringer als die von Ombrometern gemessenen Werte und

insbesondere im Bereich höherer Niederschlagsintensitäten macht sich die Mittelung des Niederschlags über die Fläche der Radarpixel in Form einer Dämpfung hoher Werte bemerkbar.

Für die Ableitung von R-Faktoren haben FISCHER et al (2018) ähnliche Effekte festgestellt und Korrekturfaktoren ermittelt, welche die Unterschätzung des R-Faktors durch die Radardaten ausgleichen sollen. Die Faktoren umfassen einen *spatial scaling factor*, welcher die Dämpfung der Intensitätsspitzen durch die Mittelung des Niederschlags über bestimmte Flächen abbildet, und einen *method factor*, welcher die systematische Unterschätzung der Erosivität durch die Radardaten im Vergleich zu Ombrometermessungen ausgleichen soll.

Zusätzlich wurde in mehreren Studien zuletzt der Einfluss der zeitlichen Auflösung von Niederschlagsdaten auf die Berechnung des R-Faktors untersucht. Grundsätzlich stimmen die Autoren darin überein, dass die Höhe des R-Faktors mit abnehmender zeitlicher Auflösung abnimmt. Die für die Ermittlung der kinetischen Energie des Niederschlags maßgeblichen Intensitätsspitzen können mit abnehmender zeitlicher Auflösung immer schlechter abgebildet werden und werden somit abgedämpft. Über die Korrektur dieses Effekts besteht jedoch noch Uneinigkeit, da für die Höhe etwaiger Korrekturfaktoren entscheidend ist, welche zeitliche Auflösung als Referenz verwendet wird. FISCHER et al (2018) setzen in ihrer Untersuchung basierend auf Ombrometer- und Radardaten für Deutschland eine Minute als höchste mögliche Auflösung für den Faktorwert 1 an. PANAGOS et al. (2016) hingegen verwenden in ihrer europaweiten Studie auf Basis von Ombrometerdaten eine Referenz von 30 Minuten als Faktor 1. Für das RADKLIM YW-Produkt mit 5-minütiger Auflösung ergibt sich somit ein zeitlicher Korrekturfaktor von 1,05 (FISCHER et al 2018) bzw. 0,7984 (PANAGOS et al. 2016); für das stündlich aufgelöste RW-Produkt betragen die zeitlichen Korrekturfaktoren 1,9 bzw. 1,5597.

Zusammenfassend können für die Ableitung von R-Faktoren für das Bundesland Hessen aus der Radarklimatologie und Ombrometerdaten des gleichen Zeitraums 2001-2016 folgende Hypothesen aufgestellt werden:

1. Die neu abgeleiteten R-Faktoren aus beiden Datensätzen sind auf Grund von Klima- und Wetterveränderungen höher als die R-Faktoren aus älteren Berechnungen.
2. Die aus der Radarklimatologie abgeleiteten R-Faktoren müssten höher sein als die aus den Ombrometermessungen berechneten, weil die Radardaten auch kleinräumige konvektive Zellen lückenlos erfassen können. Gleichzeitig unterschätzen die Radarmessungen jedoch die maximalen Niederschlagsintensitäten. Letzteres kann durch die Korrekturfaktoren nach FISCHER et al (2018) jedoch kompensiert werden.
3. Die räumliche Verteilung der R-Faktoren aus der Radarklimatologie weicht auf Grund der flächendeckenden Erfassung aller Starkregenereignisse von den Mustern der mittels Regressionsgleichung ermittelten und interpolierten R-Faktoren ab.

6.2 Methodik

6.2.1 Berechnung des R-Faktors nach DIN19708

Die Berechnung der R-Faktoren erfolgte gemäß der Vorgaben nach DIN19708 jeweils für das 5-minütig aufgelöste YW-Produkt der Radarklimatologie und Ombrometerdaten des HLNUG und DWD, die

ebenfalls auf eine zeitliche Auflösung von 5 Minuten aggregiert wurden. Auf Grund der um ein Jahr längeren Zeitreihe und der weiter entwickelten Plausibilitätskontrolle wurden jedoch die von KREKLOW et al. (2019b) aufbereiteten DWD-Ombrometerdaten anstelle der in Kap. 2.2.2 beschriebenen Ombrometerdaten des DWD verwendet und dieser Datensatz mit den vorliegenden Daten des HLNUG-Messnetzes verdichtet.

Gemäß DIN19708, welche auf den Ergebnissen von SCHWERTMANN et al. (1990) basiert, weisen erosive Niederschlagsereignisse eine Niederschlagsmenge von mindestens 10 mm oder eine Niederschlagsintensität von mehr als 10 mm/h innerhalb eines Zeitfensters von 30 Minuten auf (also eine tatsächliche Niederschlagsmenge von 5 mm in 30 Minuten). Das Maximum des Niederschlags in einem 30-Minuten-Fenster eines Niederschlagsereignisses wird mit Hilfe eines gleitenden Fensters von 6 5-Minuten-Intervallen identifiziert und durch Verdoppelung auf eine Stunde bezogen. Dieser Wert wird als I_{30} bezeichnet. Sofern ein Ereignis weniger als 30 Minuten andauert, wird die gesamte gefallene Niederschlagsmenge verdoppelt und I_{30} zugewiesen. Mehrere erosionswirksame Ereignisse werden durch eine Niederschlagspause von mindestens 6 Stunden getrennt, was mit einem Minimum von 72 niederschlagsfreien Intervallen umgesetzt wurde.

Der R-Faktor eines Niederschlagsereignisses ergibt sich aus dem Produkt der maximalen 30-Minuten-Intensität I_{30} [mm/h] und der kinetischen Energie E [kJ/m²] des gesamten während des Ereignisses gefallenen Regens.

$$R = E \cdot I_{30}$$

Die kinetische Energie E eines erosiven Ereignisses wurde mit folgenden Formeln aus DIN19708 berechnet:

$$E = \sum_{i=1,n}^{i=n} E_i$$

Mit:

$$E_i = (11,89 + 8,73 \cdot \log_{10}(I_i)) \cdot N_i \cdot 10^{-3} \quad \text{für } 0,05 \leq I_i \leq 76,2$$

$$E_i = 0 \quad \text{für } I_i < 0,05$$

$$E_i = 28,33 \cdot N_i \cdot 10^{-3} \quad \text{für } I_i > 76,2$$

Dabei ist

i ein 5-Minuten-Intervall im Niederschlagsereignis

E_i die kinetische Energie des Niederschlags im Zeitabschnitt i , in kJ/m²

N_i die Niederschlagshöhe im Zeitabschnitt i , in mm

I_i die Intensität des Niederschlags im Zeitabschnitt i , in mm/h, d. h. $I_i = N_i \cdot \frac{60 \text{ Min}}{5 \text{ Min}}$

Der R-Faktor pro Jahr für einen bestimmten Ort ergibt sich schließlich aus der Summe der Produkte $E \cdot I_{30}$ [kJ/m² mm/h = N/(ha a)] aller erosiven Regen eines Jahres. Auf Grund der großen Variabilität der Erosivität von Jahr zu Jahr wird eine Mittelung der jährlichen R-Faktoren über einen Zeitraum von mindestens zehn Jahren empfohlen. Für die Berechnungen auf Basis der Radarklimatologie ist dieses

Kriterium überall erfüllt, die Zeitreihen der Ombrometer schwanken hingegen stark. Für alle im Folgenden vorgestellten Auswertungen wurden nur die Stationen berücksichtigt, die mehr als die Hälfte des Zeitraums 2001-2015 abdecken, für den die HLNUG-Ombrometerdaten vorliegen. Alle Stationen mit weniger als neun Jahren wurden entsprechend aus dem untersuchten Datensatz entfernt.

Für die Berechnung des R-Faktors aus den vorliegenden Datensätzen war die Entwicklung neuer Routinen notwendig. Eine Schwierigkeit ist dabei der große Datenumfang des YW-Produkts für ganz Hessen, welcher bei der Entwicklung eine Abwägung zwischen Arbeitsspeicherbedarf und Rechengeschwindigkeit erforderte. Die entwickelten Routinen wurden analog zu den bereits vorgestellten Verarbeitungsmethoden in der Programmiersprache Python entwickelt und basieren auf den gleichen HDF5-Dateien mit monatlichen Data Frames. Dies ermöglicht eine durchgängige Berechnung des R-Faktors über alle Tage eines Monats hinweg. Auf fließende Übergänge zwischen den Monaten wurde aus Effizienzgründen jedoch verzichtet. Eine Übergabe aller aktuellen Parameterwerte jeder Rasterzelle für den Folgemonat ist technisch zwar möglich, reduziert die Berechnungsgeschwindigkeit aber signifikant um einen je nach Hardwareausstattung variierenden Faktor von ca. 100. Die Routine geht somit am Ende jedes Monats von einem Ende des Niederschlagsereignisses aus und führt die Berechnung für die bis dahin gefallene Niederschlagsmenge aus. Somit kann es bei lang anhaltenden nächtlichen Niederschlagsereignissen zu einer Teilung in zwei Ereignisse kommen oder ein Ereignis durch die Unterbrechung als nicht erosiv eingestuft werden. Da die Erosivität jedoch ein deutlich ausgeprägtes Maximum am späten Nachmittag aufweist (FISCHER et al. 2016), wenn üblicherweise auch die Konvektion am stärksten ist, wird die Ungenauigkeit in der Berechnung durch die Unterbrechung zum Monatswechsel als vernachlässigbar eingestuft.

6.2.2 Berechnung des R-Faktors mittels Regressionsgleichungen

Für den Erosionsatlas des HLNUG 2018 (Friedrich et al. 2019) wird der R-Faktor mit folgender Regressionsgleichung aus dem mittleren langjährigen Niederschlag der Sommermonate Mai – Oktober N_{So} abgeleitet:

$$R = 0,141 \cdot N_{So} - 1,48$$

Um die nach DIN19708 berechneten R-Faktoren (Kap. 6.2.1) mit bestehenden Werten vergleichen und die Effekte von Niederschlagsveränderungen sowie abweichender Methodik und Eingangsdaten einschätzen zu können, wurden zusätzlich R-Faktoren mittels dieser Regressionsgleichung auf Basis des RW-Produkts der Radarklimatologie und des verdichteten Ombrometerdatensatzes abgeleitet.

Zusätzlich wurde eine neue Regressionsgleichung aus den Sommerniederschlägen N_{So} und den nach DIN19708 berechneten R-Faktoren ermittelt. Alle Berechnungen erfolgten jeweils mit folgenden Datensätzen:

- a) alle Ombrometerstationen in Hessen, die eine Zeitreihe von mindestens 9 Jahren abdecken (n = 110)
- b) alle Radarpixel, die eine Ombrometerstation mit einer Zeitreihe ≥ 9 Jahre enthalten (n = 110)
- c) alle Radarpixel innerhalb Hessens (n = 23320)

6.2.3 Anwendung der Skalierungsfaktoren zum Ausgleich von Messmethodik und zeitlicher Auflösung der Eingangsdaten

Aktuelle Studien schlagen zum Ausgleich der Unterschiede zwischen Ombrometer- und Radardaten sowie zur Kompensation der zeitlichen Auflösung der Eingangsdaten verschiedene Korrekturfaktoren vor (Kap. 6.1). Um den Einfluss der Korrekturfaktoren einschätzen zu können und die mutmaßliche Unterschätzung des R-Faktors durch die Radarklimatologie zu kompensieren, wurden diese Faktoren testweise auch für die nach DIN 19708 berechneten R-Faktoren angewendet.

Die Skalierung nach FISCHER et al. (2018) für die aus der Radarklimatologie berechneten R-Faktoren ergibt sich aus

$$R_{YW,F} = R \cdot ((\text{spatial scaling} + \text{method factor}) \cdot \text{temporal scaling})$$

mit

spatial scaling factor = 1,13; bei räumlicher Auflösung von 1 km²

method factor = 0,35

temporal scaling factor = 1,05; bei zeitlicher Auflösung von 5 Minuten

Für die Ombrometerdaten reduziert sich die Skalierung auf

$$R_{O,F} = R \cdot \text{temporal scaling factor}$$

mit

temporal scaling factor = 1,05; bei zeitlicher Auflösung von 5 Minuten

Um den stark abweichenden zeitlichen Korrekturfaktor nach PANAGOS et al (2016) einzubeziehen, wurde in einer weiteren Berechnung unter Beibehaltung der anderen Faktoren mit *temporal scaling factor* = 0,7984 gerechnet.

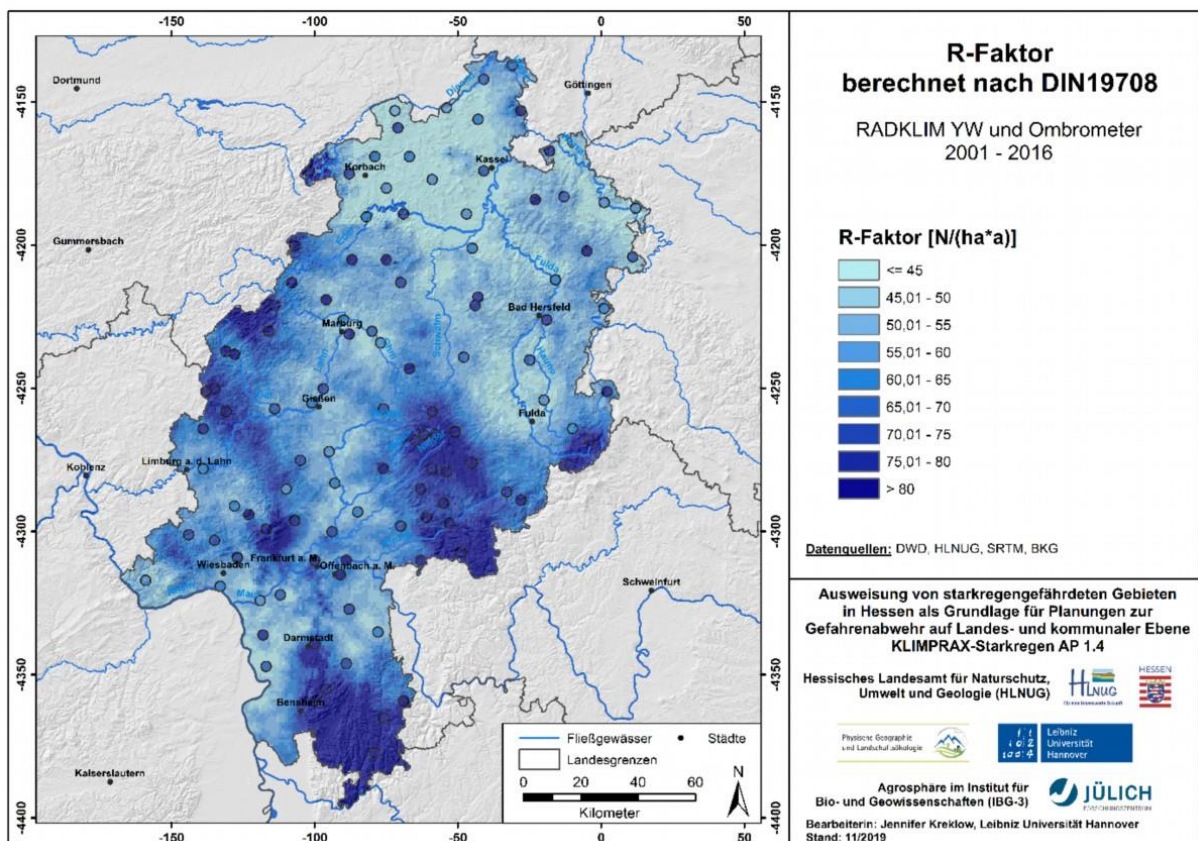
6.3 Ergebnisse

6.3.1 Räumliche Verteilung der berechneten R-Faktoren

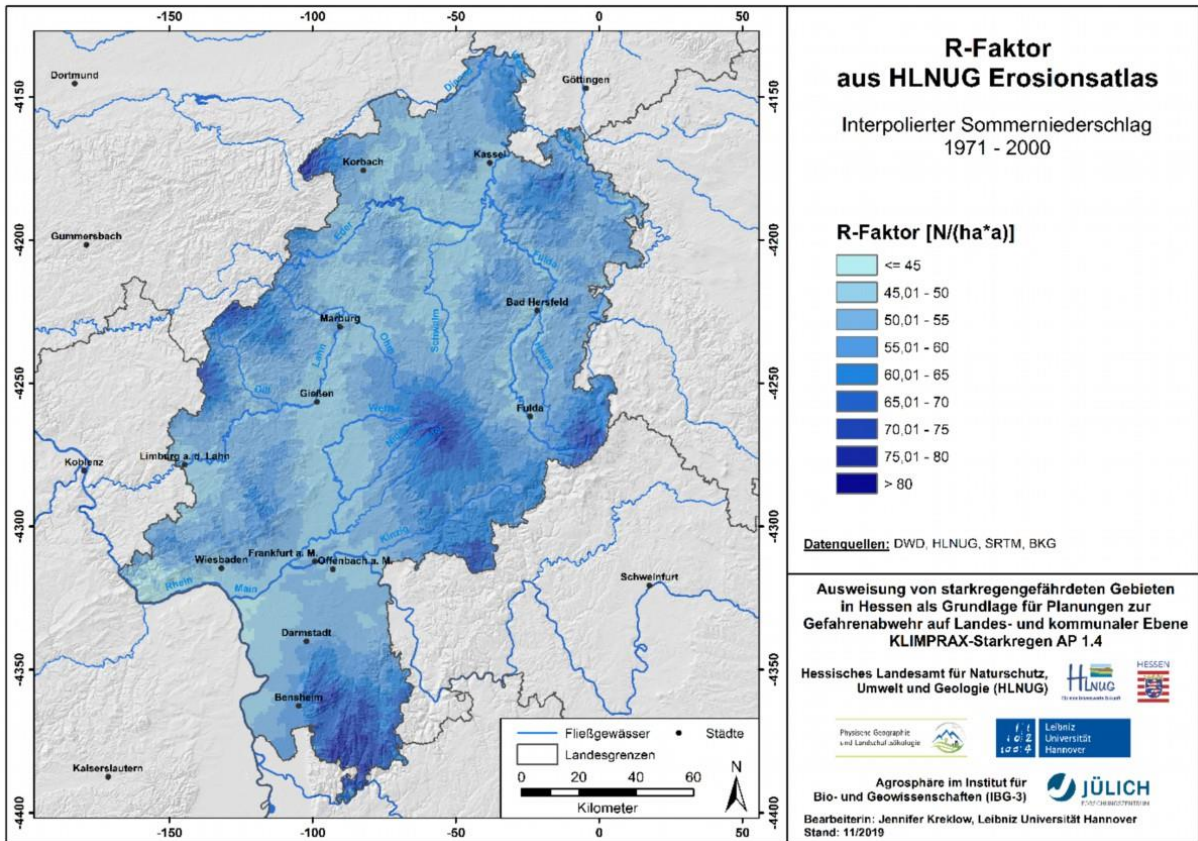
Die aus dem YW-Produkt nach DIN19708 berechneten R-Faktoren weisen Werte zwischen 28,8 und 173,2 bei einem Mittelwert von 57,96 kJ/m² mm/h auf (Karte 34). Damit sind sie um durchschnittlich 5,7% höher als die Werte aus dem Erosionsatlas 2018 des HLNUG. Die niedrigsten Werte treten erwartungsgemäß im Norden Hessens etwa zwischen Korbach, Kassel und Homberg auf, also in dem Bereich, für den 2007 und 2014 zeitweise keine Radarmessungen vorliegen. Eine Mittelung der jährlichen R-Faktoren ohne diese beiden Jahre zeigt jedoch, dass das Minimum dennoch in diesem Bereich zu verorten ist. Dies stimmt somit mit dem R-Faktor aus dem Erosionsatlas überein, welcher dort ebenfalls ein Minimum aufweist (Karte 35). Auch die Bereiche relativ geringer R-Faktoren nordwestlich von Fulda sowie in der Oberrheinischen Tiefebene stimmen in beiden Datensätzen gut überein. Im Nordosten Hessens weist der neu berechnete R-Faktor bei einer ähnlichen räumlichen Verteilung hingegen großflächig etwas geringere Werte auf. Beide Datensätze zeigen einen Anstieg des R-Faktors mit zunehmender Geländehöhe, wobei die neu berechneten R-Faktoren insbesondere

im Odenwald, Taunus, Westerwald sowie am Vogelsberg großflächig deutlich höhere Werte aufweisen. Am Vogelsberg zeigt sich jedoch auch die in der Plausibilitätsprüfung festgestellte Schwäche der Radarklimatologie, die Niederschläge in größeren Höhen korrekt zu erfassen. Die Zunahme des R-Faktors in den unteren Hangbereichen fällt dort deutlich höher aus als im Gipfelbereich (Karte 36). Im Bereich der Wetterau ist ähnlich wie bei den Niederschlagssummen auch beim R-Faktor der Radarklimatologie die Negativspeiche vom Frankfurter Radar zu erkennen, dennoch zeigt sich in diesem Bereich in den meisten Rasterzellen eine Zunahme des R-Faktors, stellenweise sogar um bis zu 45%.

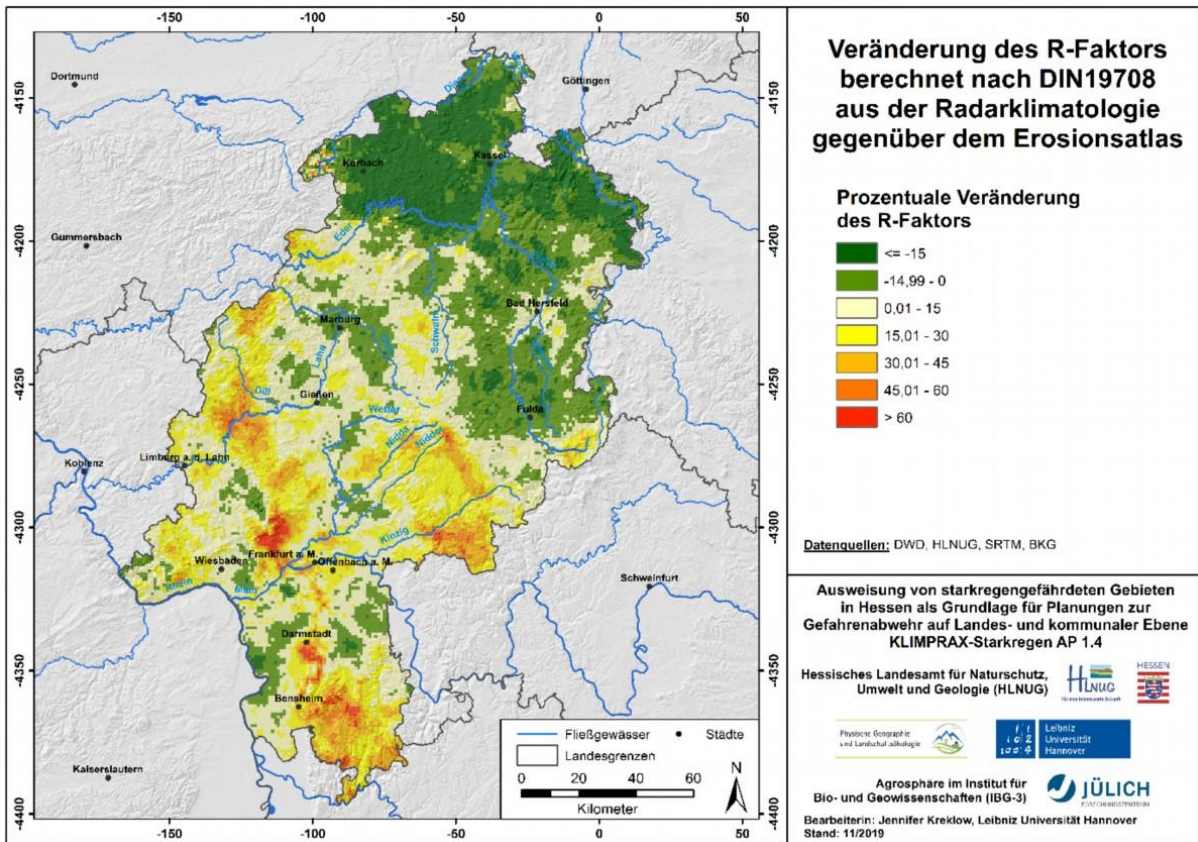
Die Ergebnisse der Plausibilitätsprüfung (Kap. 3) haben bereits gezeigt, dass die Radarklimatologie im Allgemeinen eine leichte Unterschätzung des Niederschlags aufweist, welche in größeren Höhen sowie bei hohen Intensitätsspitzen, die für die Erosivität des Niederschlags bedeutsam sind, besonders ausgeprägt ist. Die Annahme, dass die aus der Radarklimatologie berechneten R-Faktoren entsprechend zu niedrig sind, bestätigt der Vergleich mit den R-Faktoren des Ombrometerdatensatzes. Letzterer weist einen Mittelwert von $80,6 \text{ kJ/m}^2 \text{ mm/h}$ auf, was um 43,1% höher ist als der Mittelwert des Erosionsatlases und um 39% höher als das Mittel des R-Faktors aus der Radarklimatologie. An 107 von 110 Stationen weisen die Ombrometer höhere R-Faktoren auf als die entsprechenden Pixel der Radarklimatologie. Die mittlere Differenz beträgt $20,5 \text{ kJ/m}^2 \text{ mm/h}$.



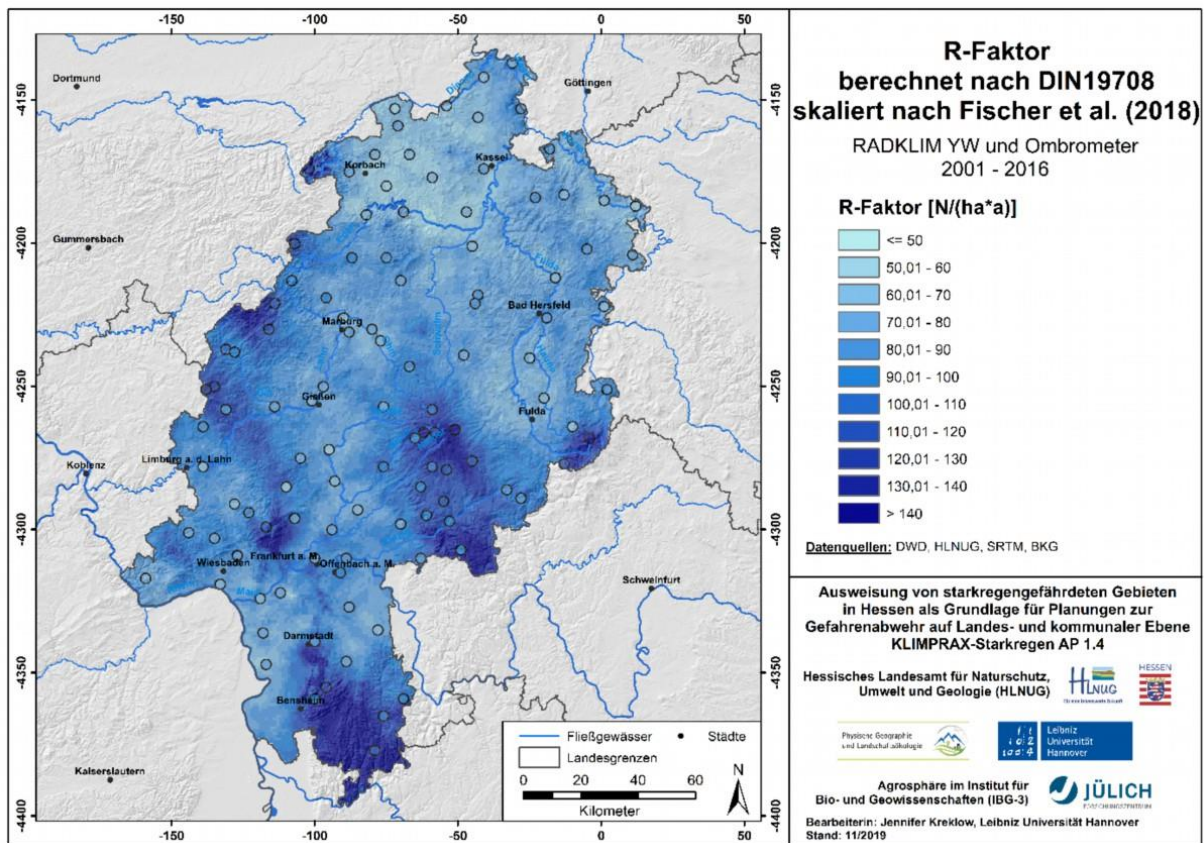
Karte 34: R-Faktor berechnet nach DIN19708 aus dem 5-minütig aufgelösten RADKLIM YW-Produkt



Karte 35: R-Faktor aus dem Erosionsatlas Hessen



Karte 36: Prozentuale Veränderung des neu abgeleiteten R-Faktors gegenüber dem Erosionsatlas

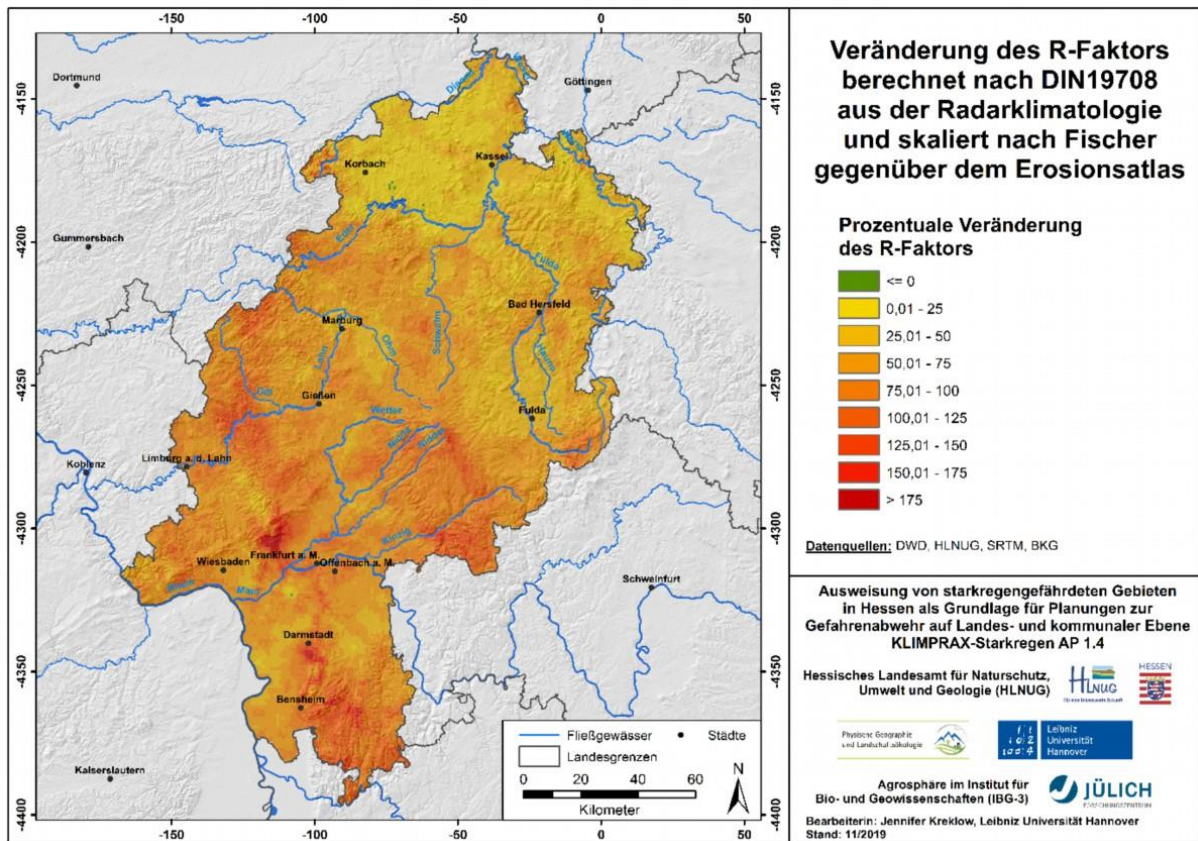


Karte 37: R-Faktor berechnet nach DIN19708 skaliert nach Fischer et al (2018)

Diese Ergebnisse decken sich mit denen von FISCHER et al. (2018), weshalb die Anwendung der vorgeschlagenen Korrekturfaktoren für sinnvoll und notwendig erachtet wurde. Nach Skalierung der R-Faktoren stimmen die Ergebnisse für Radarklimatologie und Ombrometer deutlich besser überein. Die Differenz beider Datensätze verschiebt sich zugunsten der Radarklimatologie, welche im Mittel nun um $8,8 \text{ kJ/m}^2 \text{ mm/h}$ höhere R-Faktoren aufweist (Karte 37). Zu beachten sind die abweichenden Klassifizierungen und Legenden der Kartendarstellungen.

Im Vergleich zum Erosionsatlas sind nach Skalierung beide R-Faktoren deutlich höher, die der Radarklimatologie im Mittel um 64,3% und die der Ombrometer um 50,3% (Karte 38).

Ungeachtet des zur Ableitung verwendeten Datensatzes und der Anwendung von Korrekturverfahren ist somit zweifelsohne eine Erhöhung des R-Faktors gegenüber dem derzeit im Fachinformationssystem „Erosionsatlas Hessen“ hinterlegten R-Faktor-Datensatzes festzustellen. Eine genauere Betrachtung der Dimension und der Ursachen dieser Erhöhung erfolgt im folgenden Kapitel.



Karte 38: Prozentuale Veränderung des neu abgeleiteten skalierten R-Faktors gegenüber dem Erosionsatlas

6.3.2 Statistischer Vergleich der unterschiedlichen R-Faktor Ableitungen

Die in Kap. 6.3.1 beschriebene Erhöhung der neu abgeleiteten R-Faktoren kann sowohl auf eine Veränderung des Wettergeschehens zwischen den unterschiedlichen Beobachtungszeiträumen, als auch auf die abweichende Ableitungsmethodik zurückzuführen sein.

Der basierend auf den Ombrometer-Sommerniederschlägen mit der Regressionsgleichung abgeleitete R-Faktor zeigt nur um rund 2% höhere Werte bei etwas größerer Streuung im oberen Bereich. Die Ableitung auf Basis der Radarklimatologie hingegen weist sogar durchweg geringere Werte bei Minimum, Median, Quartilen und Maximum auf (Abb. 21 und 22).

In Anbetracht der signifikanten Unterschiede zu den R-Faktor Ableitungen nach DIN19708 ist dies ein Indikator dafür, dass die für den Erosionsatlas verwendete Regressionsgleichung, welche aus Niederschlagsdaten der 1960er, 70er und 80er Jahre abgeleitet wurde, unter den heutigen Wetterbedingungen nicht mehr repräsentativ ist. Offenbar hat nur in geringem Maße eine Zunahme des Sommerniederschlags stattgefunden, sondern vielmehr eine Änderung der Starkregencharakteristik oder des Verhältnisses zwischen erosivem Niederschlag und Niederschlagsmenge. Ein möglicher Einflussfaktor wäre auch eine bessere Erfassung von Intensitätsspitzen durch moderne Ombrometer mit Wägetechnik als durch die damals üblichen Niederschlagsschreiber (QUIRMBACH et al. 2013).

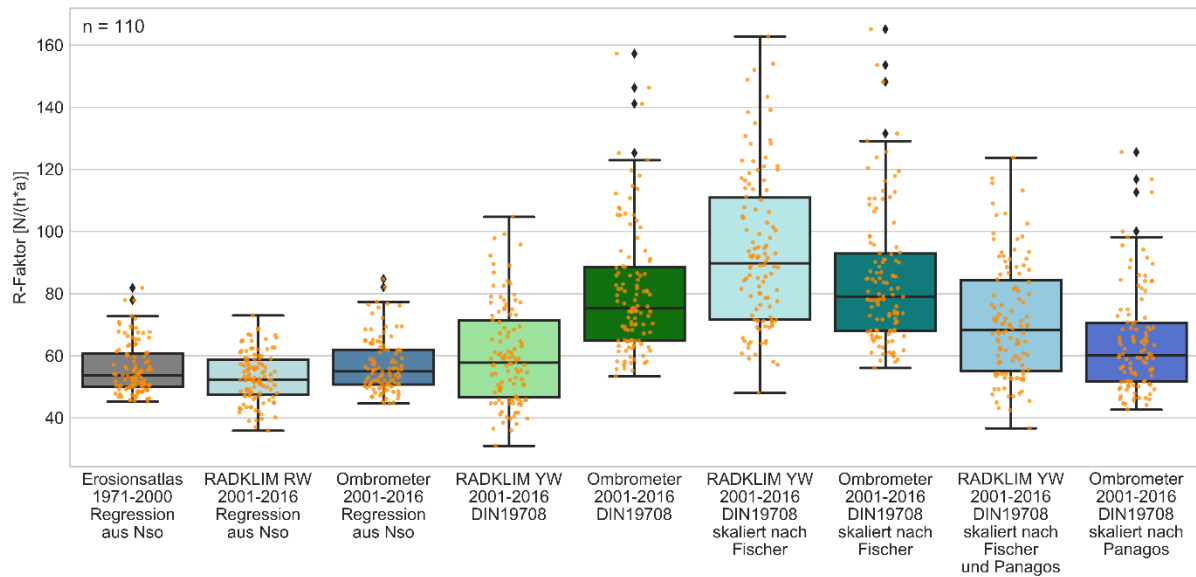


Abb. 22: Boxplots der unterschiedlichen Ableitungen des R-Faktors an den Standorten der Ombrometer

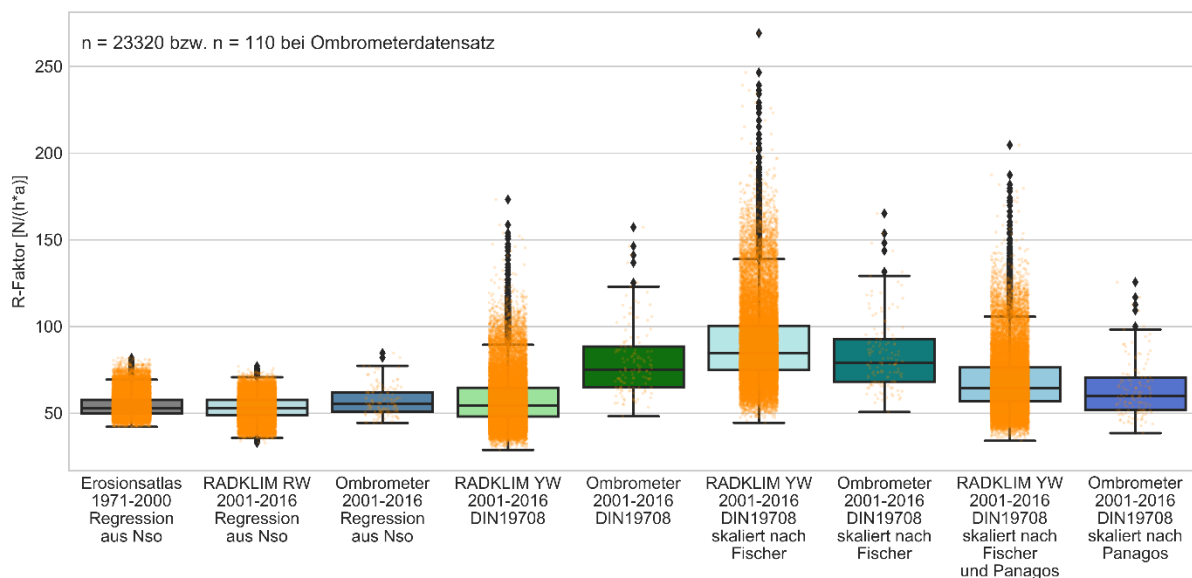


Abb. 21: Boxplots der unterschiedlichen Ableitungen des R-Faktors

Die Berechnungen neuer Regressionsgleichungen aus den Ombrometerdaten und der Radarklimatologie zeigen eine starke Korrelation von Sommerniederschlag und R-Faktor und einen erheblich steileren Verlauf der ermittelten Geraden (Abb. 23 und 24). Bei der Radarklimatologie liegen noch einige Datenpunkte, welche überwiegend im Bereich der bereits mehrfach thematisierten Radarlücke im Norden Hessens lokalisiert sind, unterhalb der Regressionsgeraden aus dem Erosionsatlas. Bei den Ombrometerdaten hingegen liegen alle Datenpunkte oberhalb. Folglich würde die im Erosionsatlas verwendete Regressionsgleichung für keines der Ombrometer einen gemäß DIN19708 korrekten R-Faktor für den Zeitraum 2001-2016 ausweisen.

Bei Betrachtung der neu abgeleiteten Regressionsgleichungen aus der Radarklimatologie fällt zudem auf, dass die Gleichungen für den gesamten Datensatz und die Pixel an den Ombrometerstandorten

nahezu identisch sind (Abb. 23). Folglich können die Standorte der Ombrometer als sehr repräsentativ für die allgemeine Abbildung der Niederschlagserosivität Hessens angesehen werden.

Ein auffälliger Unterschied im Hinblick auf den Stichprobenumfang sind hingegen einige sehr hohe R-Faktoren im Bereich zwischen 400 und 500 mm Sommerniederschlag, die nur im gesamten Radarklimatologie-Datensatz enthalten sind, sich auf Grund ihrer relativ geringen Anzahl jedoch nicht signifikant in der Regression bemerkbar machen. Hier ist davon auszugehen, dass sich besonders intensive Einzelereignisse auf Grund der vergleichsweise kurzen Zeitreihe stark durchprägen. Diese Ereignisse konnten nur durch die hohe räumliche Auflösung des Radars erfasst werden und sind im Ombrometerdatensatz nicht enthalten.

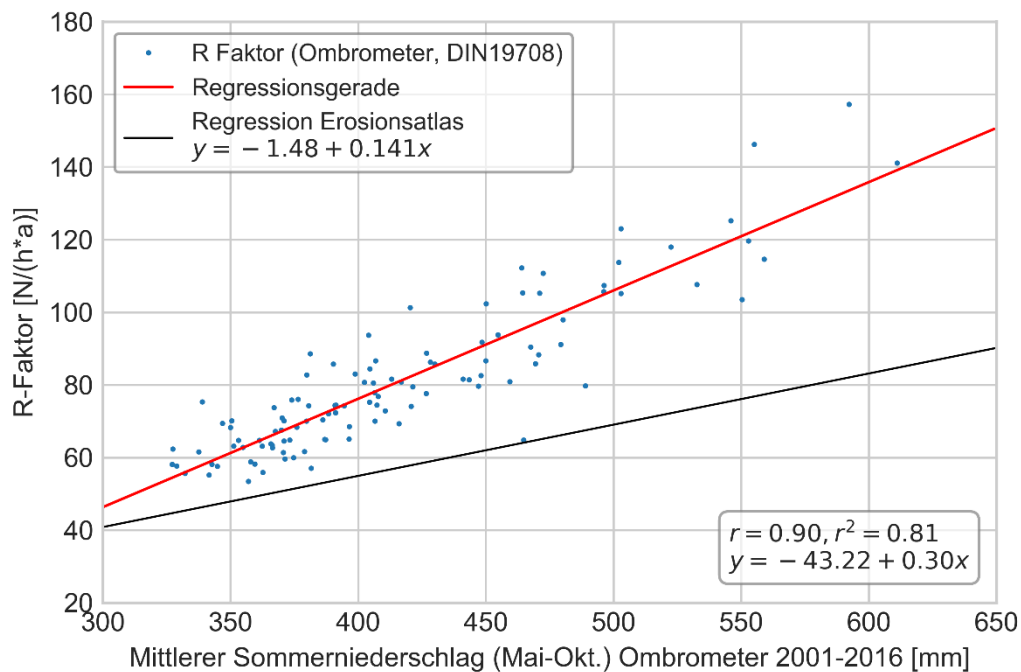


Abb. 24: Korrelation zwischen mittlerem Sommerniederschlag und R-Faktor des Ombrometerdatensatzes

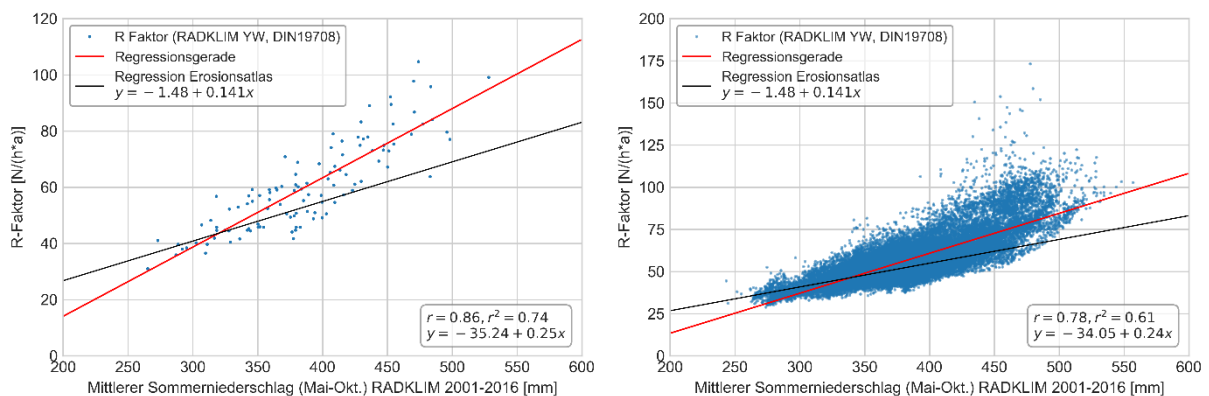


Abb. 23: Korrelation zwischen mittlerem Sommerniederschlag und R-Faktor der Radarklimatologie. Links: Pixel an Ombrometern, Rechts: Alle Pixel in Hessen

In Bezug auf die Skalierung der R-Faktoren, welche in neueren Studien zum R-Faktor vorgeschlagen wird, ist festzuhalten, dass eine Korrektur und Erhöhung der R-Faktoren aus der Radarklimatologie zwingend erforderlich ist um die Unterschätzung des Radars zu kompensieren. Die Höhe der notwendigen Korrektur ist mangels Referenz jedoch schwer abzuschätzen. Werden die Ergebnisse des Ombrometerdatensatzes als korrekte Werte zur Validierung angesehen, erscheint die Korrektur insbesondere bei Betrachtung von Abbildung 22 etwas zu hoch. Bei gleichem Stichprobenumfang und gleicher Lage der Datenpunkte fällt der Vorteil des Radars, dass tendenziell mehr Ereignisse erfasst werden, nicht ins Gewicht. Allerdings entspricht der Median des skalierten R-Faktors aus der Radarklimatologie nahezu dem dritten Quartil des skalierten R-Faktors aus dem Ombrometerdatensatz. Hier ist eine direkte Übertragbarkeit der Korrekturfaktoren, welche aus einer vierjährigen Messreihe von 12 Ombrometern innerhalb eines Quadratkilometers in Bayern abgeleitet wurden (FISCHER et al 2018), möglicherweise nur eingeschränkt gegeben.

Die Skalierung nach PANAGOS et al (2016) zur Kompensation der zeitlichen Auflösung der Eingangsdaten liefert hingegen sehr fragwürdige Ergebnisse. Unter Berücksichtigung der Plausibilitätsprüfung der Radarklimatologie und der Vergleiche zu den Ombrometerdaten ist eine Unterschätzung des R-Faktors durch die Radardaten zweifelsfrei gegeben. Da der Korrekturfaktor nach Panagos den R-Faktor der Ombrometer auf ein nahezu identisches Niveau wie das der Radarklimatologie reduziert, ist hier von einem zu niedrigen Korrekturfaktor auszugehen. Der Korrekturfaktor, dessen Ableitung auf einem Ombrometerdatensatz für ganz Europa beruht und gleichermaßen Daten maritimer, kontinentaler, gemäßigter, subpolarer und mediterraner Klimate einbezieht, erscheint somit nicht repräsentativ für Hessen.

6.4 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der R-Faktor Auswertungen haben gezeigt, dass die eingangs aufgestellte Hypothese 1 zweifelsfrei zutrifft. Die neu abgeleiteten R-Faktoren aus Ombrometer- und Radardaten sind auf Grund von Klima- und Wetterveränderungen höher als die R-Faktoren aus älteren Berechnungen.

Der in Hypothese 2 formulierte Widerspruch zwischen den theoretisch höheren R-Faktoren der Radarklimatologie auf Grund der vollständigeren Erfassung aller erosiven Regen einerseits und der Unterschätzung der R-Faktoren durch die Dämpfung von Intensitätsspitzen andererseits konnte ebenfalls festgestellt werden. Im räumlichen Mittel sowie bei Betrachtung der Station-Pixel Datenpaare, welche den Einfluss der höheren räumlichen Auflösung weitgehend eliminiert, sind die R-Faktoren der Ombrometer mitunter deutlich höher, allerdings zeigen sich bei Betrachtung des gesamten Radardatensatzes einige markante Ausreißer mit sehr hohen R-Faktoren, die von den Ombrometern nicht erfasst wurden. Auf Grund ihrer vergleichsweise geringen Anzahl haben sie jedoch keinen signifikanten Einfluss auf den räumlichen Mittelwert. Die Korrektur der R-Faktoren nach FISCHER et al (2018) liefert eine Verbesserung der Ergebnisse für die Radarklimatologie, wenngleich über eine etwas zu starke Erhöhung diskutiert werden kann.

Die räumliche Verteilung der neu berechneten R-Faktoren und der aus dem Erosionsatlas zeigt eine relativ gute Übereinstimmung mit Minima und Maxima in ähnlichen Regionen sowie einer übereinstimmenden Abbildung einer Reliefabhängigkeit. Vergleichsweise geringere Werte zeigt die

Radarklimatologie im Nordosten Hessens, während sie insbesondere in den Kammlagen der Mittelgebirge und in den zentralhessischen Flachlandbereichen, z.B. der Wetterau, großflächig höhere R-Faktoren aufweist als der Erosionsatlas.

7 Zusammenfassung

Das Forschungsprojekt „Ausweisung von starkregengefährdeten Gebieten in Hessen für Planungen zur Gefahrenabwehr auf Landes- und kommunaler Ebene“, dessen Arbeiten der Erfüllung des Teilprojektes 1.4 in KLIMPRAX-Starkregen dienen, befasst sich mit der Auswertung der Radarklimatologie (RADKLIM) des DWD für Hessen und der darauf aufbauenden Erstellung von Starkregen-Hinweiskarten. Diese sollen eine erste grobe Einschätzung der Starkregengefährdung einer Kommune oder Region ermöglichen und so dazu beitragen, die Grundlagen für ein Starkregen-Management für das Bundesland Hessen zu schaffen.

Das Projekt ist in fünf wesentliche Projektbausteine unterteilt. Der erste Baustein beinhaltet die Beschaffung und Aufbereitung aller Daten, die für die Auswertung und Plausibilitätsprüfung der Radarklimatologie notwendig sind. Dazu zählen die Beschaffung von Geodaten zu Höhe, Windenergieanlagen, Flugrouten des Flughafens Frankfurt, Radarstandorten und –radien, die Recherche einer Datenbank zu Starkregenereignissen und deren Auswirkungen im Untersuchungszeitraum 2001-2016, die Prozessierung und Aufbereitung von Ombrometerdaten des DWD und des HLNUG sowie die Prozessierung der Radarklimatologie selbst. Auf Grund der Größe des RADKLIM-Datensatzes sowie des Mangels an verfügbarer Software, stellt letzteres den zentralen Bestandteil des ersten Arbeitspakets dar. Durch die um rund ein Jahr verzögerte Bereitstellung der vollständigen, fertigen Radarklimatologie, auf der die Bearbeitung aller folgenden Projektbausteine basiert, kam dem Projektbaustein 1 eine größere Bedeutung zu als ursprünglich vorgesehen. Es bestand die Notwendigkeit, anhand von Testdaten neue Routinen zur automatisierten Verarbeitung der RADKLIM-Daten zu entwickeln, welche es ermöglichen sollten, nach Eingang der Radarklimatologie eine zügige Bearbeitung der folgenden Arbeitspakete zu ermöglichen und so Zeit innerhalb des Projekts aufzuholen. Ergebnis dieses Projektbausteins ist die als Open Source Software veröffentlichte Python-Bibliothek radproc, deren im ersten Projektjahr entwickelte Funktionen einen erheblichen Beitrag zur weitgehend planmäßigen Erfüllung der folgenden Arbeitspakete geleistet haben.

Der zweite Projektbaustein umfasst die Plausibilitätsprüfung der Radarklimatologie. Die Qualität des RADKLIM-Datensatzes wurde im Hinblick auf die üblichen Schwächen und Artefakte von radarbasierten Niederschlagsmessungen sowie gezielt auf bekannte Kritikpunkte des operationellen RADOLAN-Datensatzes in Hessen untersucht. Die Auswertungen haben gezeigt, dass die Reanalyse des Radardatenarchivs eine erhebliche Verbesserung der Datenqualität im Vergleich zu den RADOLAN-Daten bewirkt hat. Die Niederschlagssummen werden in der neuen Radarklimatologie realistisch abgeschätzt, im Mittel und insbesondere im Winter sind die Summen jedoch etwas geringer als in den Ombrometerdaten. Insbesondere im Winterhalbjahr kommt es durch die Kombination der Effekte des Overshootings und der geringeren Reflektivität fester Hydrometeore noch immer zu einer Unterschätzung orographischer Niederschläge. Zudem weisen die Radardaten auf Grund der Mittelung des Niederschlags über die Pixelfläche weniger Intervalle hoher Niederschlagsintensität auf als die Ombrometerdaten. Es gibt darüber hinaus noch einige Negativspeichen, allerdings konnte deren Ausprägung und Anzahl deutlich reduziert werden. Die in den RADOLAN-Daten mitunter extremen Clutterpixel an Windenergieanlagen konnten in der Radarklimatologie in Hessen zudem nahezu vollständig beseitigt werden. Ein großer Vorteil der Radarklimatologie gegenüber den

Ombrometerdaten ist neben der hohen räumlichen Auflösung die weitgehend homogene und vollständige Zeitreihe für den Untersuchungszeitraum, was die Auswertung der Daten in der Praxis vereinfacht und die Verlässlichkeit getroffener Aussagen erhöht. Fehlzeiten werden vorrangig durch Veränderungen und technische Aufrüstungen des Radarmessnetzes verursacht und sind gut dokumentiert. Fehlwerte im Datensatz sind entsprechend selten, aber deutlich in den Auswertungen erkennbar, da sie wie im Fall Nordhessens große, aber durch die Radarradien klar abgrenzbare Flächen betreffen. Zusammenfassend zeigt die Radarklimatologie großes Potenzial und eine gute Eignung für alle im Projekt vorgesehenen Anwendungen, allerdings müssen bei der Interpretation der Ergebnisse eine gewisse Unterschätzung von Niederschlagssummen und Intensitätsspitzen, insbesondere im Winterhalbjahr und in größeren Höhen, sowie einige verbliebene sichtbare Radarartefakte und die Fehlwerte der Jahre 2007 und 2014 in Nordhessen berücksichtigt werden.

Projektbaustein 3 umfasst basierend auf der Radarklimatologie die Analyse der Starkregencharakteristik in Hessen als Grundlage für die Erstellung von Starkregen-Hinweiskarten zur ersten Einschätzung der Starkregengefährdung von Kommunen. Dabei sollen die Niederschlagsauswertungen die statistische Häufigkeit abbilden, mit der Orte von Starkregen kurzer Dauer und unterschiedlicher Schwere betroffen sind. Auf Basis des 5-minütig aufgelösten YW-Produkts der Radarklimatologie wurde für die Dauerstufen 15 und 60 Minuten jeweils die Anzahl an häufigen, seltenen und außergewöhnlichen Starkregenereignissen für jeden Pixel ermittelt. Die Einteilung der drei Klassen basiert auf den in Deutschland gängigen statistischen Wiederkehrzeiten für Bemessungsregen und die Niederschlags-Schwellenwerte wurden entsprechend der hessischen Mittelwerte aus KOSTRA gewählt. Mittels eines eigens entwickelten Klassifikations- und Zählalgorithmus wurden so insgesamt sechs Datensätze zur Abbildung der statistischen Häufigkeit und Schwere von Starkregenereignissen in Hessen erstellt, die als Grundlage für die Ableitung des Starkregenhinweis-Index in Projektbaustein 4 dienen.

Um räumlich differenzierte Aussagen zu den Auswirkungen von Starkniederschlägen in Hessen machen zu können, werden in dieser Arbeit ein Starkregenhinweis-Index und ein Vulnerabilitäts-Index neu entwickelt. Der Starkregenhinweis-Index kombiniert die statistischen Häufigkeiten der Starkregenereignisse verschiedener Schwellenwerte mit dem Ausmaß versiegelter Flächen, dem Relief und den in Abhängigkeit des jeweiligen Starkniederschlags-Schwellenwerts auftretenden Wasserständen. Den räumlichen Bezug bilden dabei Gitterzellen mit 1 km² Zellengröße. Die entstehende Karte zeigt Gefährdungsschwerpunkte u.a. im Rhein-Main-Gebiet, im Lahn-Dill-Bergland sowie in den Räumen Gießen, Darmstadt und Fritzlar-Melsungen. Zur Plausibilisierung der Karte wurden 46 Starkniederschlagsereignisse und ihre Auswirkungen in Hessen im Zeitraum 2001-2016 recherchiert und mit der Karte des Starkregenhinweis-Index verglichen. Dabei zeigt sich ein hohes Maß an Übereinstimmung zwischen den Ereignissen und dem Index. Die Karte stellt somit ein geeignetes Werkzeug dar, um gefährdete Gebiete in Hessen zu identifizieren. Zur weiteren Untergliederung des Starkregenhinweis-Index dient der Vulnerabilitäts-Index, der eine weitere Priorisierung der von Starkregen besonders betroffenen Gebiete hinsichtlich der Bevölkerungsdichte, der Dichte an Industrieanlagen, in denen mit Gefahrstoffen umgegangen wird, der Krankenhausdichte sowie der Bodenerosionsgefahr erlaubt.

Während bei der in den Projektbausteinen 3 und 4 erstellten Starkregen-Hinweiskarte die Auswirkungen von Starkregen im urbanen Raum im Vordergrund stehen, befasst sich das abschließende Arbeitspaket 5 mit der Ableitung des R-Faktors der Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung primär mit den Auswirkungen im ländlichen Raum. Es wurde eine neue Routine entwickelt, mit der sowohl aus dem YW-Produkt der Radarklimatologie als auch aus den Ombrometerdatensätzen der R-Faktor gemäß DIN197098 berechnet wurden. Die Auswertung der Ergebnisse hat gezeigt, dass die räumliche Verteilung der neu berechneten R-Faktoren und der bestehenden Ableitung aus dem Erosionsatlas des HLNUG eine relativ gute Übereinstimmung aufweisen. Die Minima und Maxima befinden sich in ähnlichen Regionen und alle Ableitungen zeigen eine übereinstimmende Reliefabhängigkeit. Die Radarklimatologie zeigt im Vergleich relativ niedrige R-Faktoren im Nordosten Hessens, während sie insbesondere in den Kammlagen der Mittelgebirge und in den zentralhessischen Flachlandbereichen, z.B. der Wetterau, großflächig höhere R-Faktoren aufweist als der Erosionsatlas. Auch beim R-Faktor zeigt sich im Vergleich zu den Ombrometerdaten eine merkliche Unterschätzung durch die Radarklimatologie, welche durch Korrekturfaktoren jedoch gut kompensiert werden kann. Insgesamt weisen die neu abgeleiteten R-Faktoren aus Ombrometer- und Radardaten auf Grund von Klima- und Wetterveränderungen deutlich höhere R-Faktoren auf als ältere Berechnungen, sodass die Gültigkeit der häufig verwendeten, älteren Regressionsgleichungen unter den aktuellen Klimabedingungen in Frage gestellt werden muss.

Quellenverzeichnis

ABDELLA, Y. & K. ALFREDSEN 2010: A GIS toolset for automated processing and analysis of radar precipitation data. *Computers & Geosciences* 36 (4), S. 422–429.

AUERSWALD, K., FISCHER, F. K., WINTERRATH, T. & R. BRANDHUBER 2019: Rain erosivity map for Germany derived from contiguous radar rain data. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 23(4), 1819–1832.

BURT, T., BOARDMAN, J., FOSTER, I., & N. HOWDEN 2016: More rain, less soil: Long-term changes in rainfall intensity with climate change, *Earth Surf. Proc. Land.*, 41, 563–566.

DIN19708: Bodenbeschaffenheit – Ermittlung der Erosionsgefährdung von Böden durch Wasser mit Hilfe der ABAG. Normenausschuss Wasserwesen (NAW) im DIN, 2005.

DWA (DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL) 2006: Arbeitsblatt DWA-A 118 - Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen. DWA-Regelwerk A 119. Hennef.

DWA 2012: Arbeitsblatt DWA-A 531 – Starkregen in Abhängigkeit von Wiederkehrzeit und Dauer; DWA-Regelwerk A 531. Hennef.

DWA 2016: Merkblatt DWA-M 119 - Risikomanagement in der kommunalen Überflutungsvorsorge für Entwässerungssysteme bei Starkregen. DWA-Regelwerk M 119. Hennef.

DWD (DEUTSCHER WETTERDIENST) 2015: Jahresbericht 2014.

http://www.dwd.de/DE/leistungen/jahresberichte_dwd/jahresberichte_pdf/jahresbericht_2014.pdf?blob=publicationFile&v=3

Erstellt: 24.06.2015, Abruf: 04.08.2017

DWD (DEUTSCHER WETTERDIENST) 2016a: Climate Data Center – RADOLAN.

ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/grids_germany/hourly/radolan/

Erstellt: 2016, Abruf: 05.10.2016

DWD (DEUTSCHER WETTERDIENST) 2016b: Jahresbericht 2015.

http://www.dwd.de/DE/leistungen/jahresberichte_dwd/jahresberichte_pdf/jahresbericht_2015.pdf?blob=publicationFile&v=2

Erstellt: 08.09.2016, Abruf: 04.08.2017

DWD (DEUTSCHER WETTERDIENST) 2017: RADOLAN – Klima. Erstellung einer radargestützten hochaufgelösten Niederschlagsklimatologie für Deutschland zur Auswertung der rezenten Änderungen des Extremverhaltens von Niederschlag. Beschreibung des Kompositformats Version 1.0.

DWD (DEUTSCHER WETTERDIENST) 2017: KOSTRA 2010R.

ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/grids_germany/return_periods/precipitation/KOSTRA/KOSTRA_DWD_2010R/gis/

HÄCKEL, H. 2008: Meteorologie (6. Auflage). Stuttgart, Eugen Ulmer.

HDF5 GROUP 2016: Limits in HDF5.

<https://support.hdfgroup.org/HDF5/faq/limits.html>

Erstellt: 07.09.2016, Abruf: 24.07.2017

HEISTERMANN, M., JACOBI, S., & T. PFAFF 2013: Technical Note: An open source library for processing weather radar data (wradlib). Hydrology and Earth System Sciences 17, 863-871.

HLNUG (HESSISCHES LANDESAMT FÜR NATURSCHUTZ, UMWELT UND GEOLOGIE) o. J.: R-Faktor.
<https://www.hlnug.de/themen/boden/auswertung/bodenerosionsbewertung/bodenerosionsatlas/r-faktor>

Erstellt: k.A., Abruf: 11.11.2019

HOCHSCHULE RHEIN-MAIN 2016: Routinen zur Verwendung von RADOLAN Radarniederschlagsdaten in der Ingenieurhydrologie.

<http://www.hs-rm.de/de/fachbereiche/architektur-und-bauingenieurwesen/forschungsprofil/arbeitsgruppe-starkregen-und-sturzfluten/projekt-klimprax-ap1/radar-software/>

Erstellt: September 2016, Abruf: 24.07.2017

FISCHER, F., HAUCK, J., BRANDHUBER, R., WEIGL, E., MAIER, H., & K. AUERSWALD 2016: Spatio-temporal variability of erosivity estimated from highly resolved and adjusted radar rain data. Agricultural and Forest Meteorology, 223, 72-80. DOI:10.1016/j.agrformet.2016.03.

FISCHER, F. K., WINTERRATH, T. & K. AUERSWALD 2018: Temporal- and spatial-scale and positional effects on rain erosivity derived from point-scale and contiguous rain data. Hydrology and Earth System Sciences, 22(12), 6505–6518.

FRIEDRICH, K., SCHMANKE, M., TETZLAFF, B. & T. VORDERBRÜGGE 2019: Erosionsatlas Hessen.- Tagungsband d. Jahrestagung der DBG/BGS, Kommission VI, „Erd-Reich und Boden-Landschaft“, August 2019, Bern, 8 S.

KREKLOW, J. 2018: Radproc - A GIS-compatible Python-Package for automated RADOLAN Composite Processing and Analysis. Zenodo. DOI: 10.5281/zenodo.1313701.

KREKLOW, J. 2019: Facilitating radar precipitation data processing, assessment and analysis: A GIS-compatible Python approach. Journal of Hydroinformatics 21, 652–670.

KREKLOW, J., TETZLAFF, B., KUHN, G. & B. BURKHARD 2019a: A rainfall data inter-comparison dataset for Germany (Version 1.0). Zenodo. DOI: 10.5281/zenodo.3262172.

KREKLOW, J., TETZLAFF, B., KUHN, G. & B. BURKHARD 2019b: A Rainfall Data Intercomparison Dataset of RADKLIM, RADOLAN, and Rain Gauge Data for Germany. Data 4, 118.

LETTENMAIER, D.P. & E.F. WOOD 1993: Hydrologic Forecasting. In: Maidment, D.R. (ed.): Handbook of Hydrology. New York, 26.1-26.30.

LUBW (LANDESANSTALT FÜR UMWELT, MESSUNGEN UND NATURSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG) 2016: Leitfaden Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg. Karlsruhe.

MCKINNEY, W. 2015: Datenanalyse mit Python – Auswertung von Daten mit pandas, NumPy und IPython. Heidelberg, 469 S.

MENK, P. & C. LÖNS-HANNA 2011: Häufung von Starkregenereignissen in Hessen 2011.- Jahrbuch 2011 des HLNUG. https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/das_hlug/jahresbericht/2011/jb2011_031-046_W3_Menk_Loens-Hanna_final.pdf, zuletzt aufgerufen am 13.11.2019

MICHELSON, D. B., LEWANDOWSKI, R., SZEWCZYKOWSKI, M., BEEKHUIS, H. & G. HAASE 2014: EUMETNET OPERA weather radar information model for implementation with the HDF5 file format. Version 2.2 http://eumetnet.eu/wp-content/uploads/2017/01/OPERA_hdf_description_2014.pdf
Erstellt: 21.03.2014, Abruf: 25.07.2017

PANAGOS, P., BORRELLI, P., SPINONI, J., BALLABIO, C., MEUSBURGER, K., BEGUERÍA, S., KLIK, A., MICHAELIDES, S., PETAN, S., HRABALÍKOVÁ, M., OLSEN, P., AALTO, J., LAKATOS, M., RYMSZEWICZ, A., DUMITRESCU, A., PERČEC TADIĆ, M., DIODATO, N., KOSTALOVA, J., ROUSSEVA, S., BANASIK, K. & C. ALEWELL 2016: Monthly Rainfall Erosivity: Conversion Factors for Different Time Resolutions and Regional Assessments. *Water*, 8(4), 119.

PEUBNER, J. 2013: Untersuchung der Nutzbarkeit von zeitlich hoch aufgelösten Radardaten des Niederschlags zur verbesserten Simulation des Bodenabtrags durch Wasser.- Masterarbeit Forschungszentrum Jülich u. Leibniz Universität Hannover.

QUIRMBACH, M., EINFALT, T., LANGSTÄDTLER, G., JANßEN, C., REINHARDT, C., & B. MEHLIG 2013: Extremwertstatistische Untersuchung von Starkniederschlägen in NRW (ExUS). *Korrespondenz Abwasser und Abfall* 2013, 60 (7), 591 – 599.

RICHARDSON, J.R. & P.Y. JULIEN 1994: Suitability of Simplified Overland Flow Equations. *Water Resources Research*, 30(3), 665-672.

SCHMITT, T. G. 2015: Bewertungskriterien zum Risikomanagement in der kommunalen Überflutungsvorsorge. Hg. v. DWA. Hamburg (14. Regenwassertage).

SCHWERTMANN, U., VOGL, W. & M. KAINZ 1990: Bodenerosion durch Wasser. Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen. 2. Aufl. Stuttgart: Ulmer.

SENE, K. 2010: Hydrometeorology – Forecasting and Applications. London.

TETZLAFF, B., KUNKEL, R., TAUGS, R. U. & F. WENDLAND 2004: Grundlagen für eine nach-haltige Bewirtschaftung von Grundwasserressourcen in der Metropolregion Hamburg.- Forschungszentrum Jülich, Reihe Umwelt/Environment, Bd. 46, Jülich, 87 S.

TETZLAFF, B., FRIEDRICH, K., VORDERBRÜGGE, T., VERECKEN, H & F. WENDLAND 2013: Distributed modelling of mean annual soil erosion and sediment delivery rates to surface waters. *Catena*, 102, 13-20. DOI: 10.1016/j.catena.2011.08.001.

WEIGL 2014a: RADOLAN-Information Nr. 37 vom 03. Juni 2014.
https://www.dwd.de/DE/leistungen/radolan/radolan_info/radolan_info_nr_37.pdf?__blob=publicationFile&v=4

WEIGL 2014b: RADOLAN-Information Nr. 39 vom 14. November 2014.
https://www.dwd.de/DE/leistungen/radolan/radolan_info/radolan_info_nr_39.pdf?__blob=publicationFile&v=2

WINTERRATH, T. 2016: Vortrag am 13. Juli 2016, KLIMPRAX-Workshop. HLNUG, Wiesbaden.

WINTERRATH, T., BRENDL, C., HAFER, M., JUNGHÄNEL, T., KLAMETH, A., WALAWENDER, E. et al. 2017: Erstellung einer dekadenischen radargestützten hoch-auflösenden Niederschlagsklimatologie für Deutschland zur Auswertung der rezenten Änderung des Extremverhaltens von Niederschlag. Abschlussbericht. Deutscher Wetterdienst, Abteilung Hydrometeorologie. Offenbach am Main.

WRADLIB.ORG o. J.: Library Reference - wradlib.io.read_RADOLAN_composite.

http://wradlib.org/wradlib-docs/latest/generated/wradlib.io.read_RADOLAN_composite.html

Erstellt: k. A., Abruf: 06.10.2016