



Erstellung einer radargestützten Niederschlagsklimatologie

(Volltitel: Erstellung einer dekadischen radargestützten hoch-auflösenden Niederschlagsklimatologie für Deutschland zur Auswertung der rezenten Änderung des Extremverhaltens von Niederschlag)

Ein Projekt der Strategischen Behördenallianz „Anpassung an den Klimawandel“

Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe

Bundesanstalt Technisches Hilfswerk

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung

Deutscher Wetterdienst

Umweltbundesamt

Abschlussbericht

August 2017

Offenbach am Main

Dr. Tanja Winterrath

**Christoph Brendel, Mario Hafer, Thomas Junghänel, Anna Klameth,
Ewelina Walawender, Elmar Weigl und Dr. Andreas Becker**

Deutscher Wetterdienst, Abteilung Hydrometeorologie

Datum: 21.08.2017

Abschlussbericht

Absender (Zuwendungsempfänger)

Name: Dr. Tanja Winterrath
Straße: Frankfurter Straße 135
Ort: 63067 Offenbach am Main
Tel.: 069/80622978
E-Mail: Tanja.Winterrath@dwd.de

Projekt / Thema: Erstellung einer dekadischen radargestützten hoch-auflösenden Niederschlagsklimatologie für Deutschland zur Auswertung der rezenten Änderung des Extremverhaltens von Niederschlag

Bearbeiter im BBSR Dr. Fabian Dosch
Bearbeiterin im BBK Susanne Krings
Bearbeiter im UBA Dr. Achim Daschkeit
Bearbeiter im THW Tobias Nothhelfer
Laufzeit 36 Monate; von 06/2014 – 05/2017

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	5
2 Klimatologische Radaranalysen – Status und Anforderungen	6
a. Überblick über internationale Aktivitäten	6
b. Anforderungen an das Projekt – Nutzerworkshops	7
3 Datengrundlage	9
a. Niederschlagsdaten des Radarmessnetzes	9
b. Niederschlagsdaten des Bodenmessnetzes	14
4 Methodik	15
a. Korrekturverfahren auf Basis der lokalen Radardaten.....	15
b. Von lokalen Reflektivitäten zum Deutschlandkomposit des Niederschlags	27
c. Das RADOLAN-Verfahren zur Aneichung.....	28
d. Disaggregation	29
e. Fazit.....	30
5 Technische Umsetzung	31
a. Reanalyseversion	31
b. Batchsystem	32
c. Postprocessing	34
d. Produktformat	34
e. RADKLIM-GIS-Toolbox.....	35
f. Fazit.....	35
6 Ergebnisse und Produkte.....	37
a. Was definiert ein Ereignis?	37
b. Klassische Statistik	37
c. Verifikation.....	41
d. Überschreitungen / Hot Spots	45
e. Statistischer Niederschlag	51
f. R-Faktor der ABAG.....	57
g. Vorregenindex	60



7 Zusammenfassung und Fazit.....	63
8 Literatur.....	66
9 Im Berichtszeitraum vom Projektnehmer realisierte Veröffentlichungen zum Projekt	70

1 Einleitung

Es ist Konsens in der Klimaforschungsgemeinschaft, dass der globale Klimawandel mit großer Wahrscheinlichkeit mit einer erhöhten Häufigkeit von witterungsbedingten Naturkatastrophen einhergeht [IPCC, 2011]. Grundlage für diese Schlussfolgerung sind im Wesentlichen die Ergebnisse globaler und regionaler Klimasimulationen. Neben Windstürmen sind insbesondere Auftreten und Häufigkeit von hydrometeorologischen Extremereignissen wie z. B. Starkregen oder Dürre ursächlich für korrespondierende Naturkatastrophen, die für den Katastrophenschutz relevant sind. So sind die Anzahl von Umwelteinsätzen der Feuerwehr im Nachgang von Extremereignissen wie Starkregen oder Hagel [Geier, 2009] sowie die Zahl der wetterbedingten Einsätze des Technischen Hilfswerks in den vergangenen Jahren gestiegen [Strotmann, 2011]. Dieser Trend wird von einer Befragung der im Katastrophenschutz eingebundenen Organisationen bestätigt, nach deren Ergebnissen neben Sturmergebnissen vor allem Hochwasser vermehrt Einsätze nach sich ziehen.

Ausgehend von den Erfahrungen der Einsatzorganisationen stellt sich die Frage, ob die im Projekt „Extremwertanalysen von Klimaprojektionszeitreihen“ vom Deutschen Wetterdienst für die Behördenallianz ermittelten Änderungen von Extremereignissen im Zuge des Klimawandels der nächsten Dekaden sich nicht teilweise auch bereits in der letzten Dekade manifestiert haben. Die Beantwortung dieser Frage in Bezug auf den hochvariablen Parameter Niederschlag erfordert eine hoch aufgelöste, flächendeckende, homogene Niederschlagsanalyse.

Um das Starkregenrisiko in Deutschland besser zu verstehen und den gesellschaftlichen Umgang damit – von der langfristigen strategischen Planung bis hin zu kurzfristigen operativen Maßnahmen – zu verbessern, hat die Strategische Behördenallianz „Anpassung an den Klimawandel“ bestehend aus BBK (Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe), BBSR (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung), DWD (Deutscher Wetterdienst), THW (Bundesanstalt Technisches Hilfswerk) und UBA (Umweltbundesamt) im April 2014 das Projekt „Radarklimatologie“ gestartet, das im Kontext der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) und des Aktionsplanes Anpassung der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (APA) steht.

Auf Basis einer Reanalyse inklusive einer um die klimatologischen Anforderungen verschärften und erweiterten Qualitätskontrolle der im Wetterradarverbund des Deutschen Wetterdienstes seit 1. Januar 2001 gewonnenen Daten wurde eine raum-zeitlich hoch auflösende Niederschlagsklimatologie in einer Auflösung von einem Quadratkilometer und einer Stunde erstellt und mit geeigneten Verfahren extremwertstatistisch ausgewertet. Dies dient nicht nur der Evaluierung der prognostischen Ergebnisse sondern auch grundsätzlich der

- verbesserten räumlichen Erfassung von Vorkommen und Veränderung des Auftretens kurzlebiger (konvektiver) Extremniederschläge in Deutschland
- Erstellung einer Referenz für die Evaluierung von Klimamodellsimulationen bzgl. extremer Niederschläge
- Konkretisierung des Schadenspotenzials durch Extremniederschlag für die Bevölkerung und Infrastruktur (Verkehr, Wasser- und Energieversorgung) in Deutschland zur Unterstützung von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel
- Schaffung einer Grundlage für vorbereitende Maßnahmen im Bevölkerungsschutz (z. B. Risikoanalyse, Bedarfsplanung)
- Unterstützung einer „wassersensiblen“ Raumgestaltung in der Landschafts- und Stadtplanung und als Instrument des vorbeugenden Hochwasserschutzes
- Verbesserung der Erosionsüberwachung in der Landwirtschaft.

2 Klimatologische Radaranalysen – Status und Anforderungen

a. Überblick über internationale Aktivitäten

Die Wetterbeobachtung mit Hilfe von Radarsystemen hat sich in den letzten Jahrzehnten in vielen Staaten der Erde etabliert. Während der Aufbau der Radarsysteme das primäre Ziel verfolgte, ein Echtzeitmonitoring der – insbesondere extremen – Wetterereignisse zu ermöglichen, stehen mittlerweile hoch aufgelöste und flächendeckende Niederschlagsdaten für einen Zeitraum zur Verfügung, der erste Schritte in Richtung einer klimatologischen Analyse der Daten erlaubt.

Goudenhoofd und Delobbe (2016a, 2016b) reprozessierten die belgischen Radardaten des RMI für den Zeitraum von 2005-2015. Die Aufbereitung der Daten umfasst die Fehlerkorrektur, die Anreicherung an bodengestützte Stationsdaten und die extremwertstatistische Auswertung der Niederschlagsprodukte. Météo France erstellte für die Zeit von 1997 bis 2006 eine Niederschlagsklimatologie auf der Basis von Radar- und Bodendaten (Tabary et al., 2012). Kernelement der Reprozessierung ist ein KED-Verfahren, bei dem die Radardaten als „external drift“ Verwendung finden. Die Reprozessierung der Daten umfasste ein klimatologisches Verfahren zur Korrektur von Speichen. KNMI berechnete für die Jahre 1998 bis 2007 eine radarbasierte, an Stationsmessungen angeeichete Niederschlagsklimatologie für die Niederlande (Overeem et al., 2009). Eine zehnjährige (2002-2012) Niederschlagsklimatologie entwickelten Thorndahl et al. (2014) für das Radar Stevns in Dänemark unter Verwendung von Bodenstationsdaten für die Anreicherung. Bližňák et al. (2016) entwickelten für die Monate Mai bis September auf der Basis angeeicherter Radardaten eine Niederschlagsklimatologie für die Tschechische Republik und analysierten Extremereignisse. Koistinen et al. (2008) leiteten statistische Niederschläge aus korrigierten radarbasierten Niederschlagsdaten für die Sommermonate Mai bis September und die Jahre 2000 bis 2005 ab. Kaltenboeck und Steinheimer (2015) untersuchten intensive Konvektionsereignisse zwischen 2008 und 2012 in Österreich, Die Datengrundlage lieferten neben den C-Band Wetterradaren ERA-Interim Reanalysen. Fairman et al. (2015) reprozessierten eine achtjährige Niederschlagszeitreihe für die Region Großbritannien und Irland. Die radarbasierten Niederschlagsanalysen in Israel beginnen bereits im Oktober 1990 und umfassen damit eine außergewöhnlich lange Zeitreihe. Marra und Morrin (2015) entwickelten statistische Niederschlagsauswertungen (Intensity-Duration-Frequency curves) für 1990 bis 2013. Basierend auf Radar- und Stationsdaten entwickelten und analysierten Berg et al. (2015) Niederschlagszeitreihen für Schweden für 2009 bis 2014. Seres und Horváth (2015) untersuchten die Gewitteraktivität über Ungarn für den Zeitraum 2004 bis 2012. Für die Schweiz steht das kombinierte Produkt CombiPrecip der Meteo Schweiz seit 2005 für klimatologische Auswertungen zur Verfügung (z. B. Rudolph et al., 2009). Prat und Nelson (2015) verwendeten die Radardaten für eine Analyse des Zeitraums 2002 bis 2012 in Kombination mit Stations- und Satellitendaten.

Darüber hinaus gibt es zahlreiche Analysen auf der Basis langjähriger radarbasierter Niederschlagszeitreihen. Einen umfangreichen Überblick über die internationalen Aktivitäten, die auf der Basis einer Literaturrecherche im Rahmen der Arbeit des WMO TT-URSDCM ermittelt und zusammengestellt wurden, gibt Keupp et al. (2016).

In Deutschland gibt es wenige Arbeiten zur klimatologischen Nutzung und Aufbereitung von Radardaten. Kronenberg und Bernhofer (2015) analysierten Radardaten für den Freistaat Sachsen. Paulat et al. (2008) verwendeten Radardaten für die Disaggregation von Stationsmessungen für den Zeitraum 2001 bis 2004. Wagner et al. (2014) analysierte auf der Basis der Radarmessungen von 2005 bis 2009 radartypische Messfehler mit Hilfe klimatologischer Untersuchungen. Die Ergebnisse der Studien von Paulat et al. (2008) und Wagner et al. (2014) wurden im Rahmen der Radarklimatologie für die Disaggregation sowie die Höhen-/Entfernungskorrektur zu Grunde gelegt und weiterentwickelt.

b. Anforderungen an das Projekt – Nutzerworkshops

Das Projekt Radarklimatologie war derart konzipiert, dass während der Projektlaufzeit ein enger Austausch mit den potenziellen Nutzern der Daten erfolgte. Um diesen Austausch zu initiieren, fand bereits in einer frühen Projektphase ein Nutzerworkshop statt. Ziel dieser Veranstaltung war es, Nutzerinteressen und -anforderungen aufzunehmen und in der Produktplanung zu berücksichtigen. Nach einer Laufzeit von ca. zwei Jahren fand ein zweiter Nutzerworkshop statt. Dieser Workshop diente in erster Linie der Bekanntmachung des Projekts und der Produkte sowie der Kommunikation zwischen der Strategischen Behördenallianz und den Nutzern.

1. Nutzerworkshop Radarklimatologie am 5. Februar 2015 in Bonn

Nach der Eröffnung des Nutzerworkshops (Abbildung 1) folgte eine Vorstellung des Projekts durch den Deutschen Wetterdienst. Anschließend präsentierten potenzielle Nutzer im Rahmen von Gastvorträgen ihre Arbeitsgebiete und stellten den Bedarf an klimatologischen Auswertungen der radarbasierten Niederschläge dar. Ein Schwerpunkt der Veranstaltung lag in den Fachgruppengesprächen, die die Themen Siedlungsentwicklung und Bevölkerungsschutz behandelten, sowie einer dritten Fachgruppe, die diverse weitere Themen diskutierte. Die Ergebnisse der Fachgruppengespräche wurden in einem Arbeitspapier [DWD, 2015] zusammengefasst. Die wichtigsten Ergebnisse des ersten Nutzerworkshops im Hinblick auf die Projektplanung lassen sich zu fünf Punkten zusammenfassen:

- Zusammenstellung abgeleiteter kundenspezifischer Produkte
- Bereitstellung der Daten in geeigneten Formaten und im standardisierten Koordinatenreferenzsystem
- Erstellung von Kartenmaterial
- Generierung von Qualitätsinformation
- Einrichten einer Kommunikationsplattform

Sehr geehrte Damen und Herren,	Workshop-Programm	Anmeldung
<p>das Thema Starkregen beschäftigt uns alle: Bevölkerungsschützer, Stadt- und Raumplaner, Meteorologen, Energieversorger, Landwirte, Versicherer und nicht zuletzt die Bürger selbst. Vor allem kurzfristige und kleinräumige Starkregenereignisse können oftmals große Schäden mit sich bringen und stellen eine Gefahr für die Bevölkerung dar.</p>	<p>10.30 Uhr Begrüßung und Vorstellung der Teilnehmer</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dr. A. Becker (DWD, Leiter des Referats Niederschlagsüberwachung) 	<p>Zur verbindlichen Anmeldung schicken Sie bitte das beiliegende Anmeldeformular ausgefüllt bis zum 12.01.2014 an:</p>
<p>Im Rahmen des Projektes „Radarklimatologie“ der Strategischen Behördenallianz aus BBK, BBSR, DWD, THW und UBA erstellt der Deutsche Wetterdienst eine hochaufgelöste Niederschlagsklimatologie auf Basis der vom DWD erhobenen Radarniederschlagsdaten. Hierbei sollen nicht nur grundlegende Fragen zur räumlichen Verteilung, Häufigkeit, Wiederkehr und Intensität extremer Niederschläge im Zeitraum 2001-2014 beantwortet werden, sondern auch auf die bereits beobachtbaren Auswirkungen von Starkregen im Untersuchungszeitraum eingegangen werden, um hieraus effektive Vorsorgemaßnahmen und Handlungsoptionen abzuleiten. Ein besonderes Augenmerk wird in diesem Projekt auf die nutzerspezifische Aufbereitung der Projektergebnisse gelegt.</p>	<p>10.45 Uhr Einführung in das Projekt „Radarklimatologie“</p> <ul style="list-style-type: none"> • Vorstellung der Projektpartner • Projektvorstellung (DWD) 	<p>Anna.Schmitt@dwd.de</p>
<p>Gerne möchten wir daher Sie, als potenzielle Nutzer der Ergebnisse, frühzeitig mit einbeziehen und würden uns freuen, Sie zu einem kreativen, fachübergreifenden Ideen- und Bedarfsaustausch in unserem ersten Nutzerworkshop begrüßen zu dürfen.</p>	<p>11.30 Uhr Gastvorträge</p> <p>Praxisanwendung Radarniederschlagsdaten</p>	<p>Die Teilnehmerzahl am Workshop ist begrenzt; die Plätze werden in der Reihenfolge der Anmeldung vergeben. Daher bitten wir Sie uns rechtzeitig zu informieren, wenn Sie kurzfristig verhindert sein sollten, um anderen Teilnehmern ein Nachrücken zu ermöglichen.</p>
<p>Die Projektpartner der Strategischen Behördenallianz</p>	<p>12.15 Uhr MITTAGSPAUSE</p>	<p>Eine Anmeldegebühr wird nicht erhoben.</p>
	<p>13.15 Uhr Fachgruppengespräche unter der Leitung von</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dr. F. Dösch (BBSR) aus Sicht der Siedlungsentwicklung • S. Krings (BBK) aus Sicht des Bevölkerungsschutzes • Dr. A. Daschkeit (UBA) aus Sicht der Klimafolgen 	<p>Posterausstellung</p>
	<p>15.30 Uhr KAFFEEPAUSE</p>	<p>Es besteht die Möglichkeit thematisch passende Posterbeiträge (z.B. zu aktuellen Projekten) zum Workshop mitzubringen und vor Ort auszustellen.</p>
	<p>16.00 Uhr Präsentation und Diskussion der Ergebnisse aus den Fachgruppengesprächen</p>	<p>Sollten Sie Interesse daran haben, vermerken Sie dies bitte im entsprechenden Abschnitt auf dem Anmeldeformular damit wir Ihnen genug Ausstellungsfläche bieten können.</p>
	<p>16.30 Uhr Zusammenfassung und Abschluss</p>	
	<p>Ende der Veranstaltung; gegen 17.00 Uhr</p>	

Abbildung 1: Programm des 1. Nutzerworkshops am 05.02.2015 in Bonn

Viele Anregungen der Nutzer wurden im Rahmen des Projekts berücksichtigt. So besteht bei Anwendung der RADKLIM-Toolbox die Möglichkeit, die Daten korrekt in ein GIS-System einzulesen, auf ein Standardgitter zu transformieren und Kartenprodukte zu erstellen. Darüber hinaus können Qualitätsinformationen über detektierte radartypische Fehler in den Einzelprodukten angezeigt werden. Zur Abschätzung der Produktqualität wurde ein Reanalyseensemble mit variierenden Bodendatensätzen gerechnet.

Im Nachgang des Workshops wurde eine interaktive Projektwebseite eingerichtet. Als Plattform wurde der BSCW-Server (<https://www.bscw.bund.de/>) gewählt, der vom Informations-TechnikZentrum Bund (ITZ-Bund, früher Bundesanstalt für IT-Dienstleistungen (DLZ-IT)) bereitgestellt wird. Der Arbeitsbereich „Projekt Radarklimatologie“ umfasst Informationen zum Projekt, stellt Berichte, Protokolle und Präsentationen zur Verfügung und lädt zur interaktiven Kommunikation im Diskussionsforum ein. Hier sind auch ausgewählte Berichte der Partner der Strategischen Behördenallianz zusammengestellt. Der Zugang zur Webseite ist passwortgeschützt; Zugangsdaten können vom Fachpublikum bei der Abteilung Hydrometeorologie des Deutschen Wetterdienstes beantragt werden.

2. Nutzerworkshop Radarklimatologie am 21. April 2016 in Offenbach

Der Schwerpunkt des zweiten Nutzerworkshops (Abbildung 2) nach knapp zwei Jahren Projektlaufzeit lag auf der Präsentation der Zwischenergebnisse und der Umsetzung der Anforderungen aus dem ersten Nutzerworkshop durch den Deutschen Wetterdienst. Darüber hinaus wurde in drei Gastvorträgen die Bedeutung der klimatologischen Radardaten in verschiedenen Anwendungen, z. B. der Wasserwirtschaft und auf dem Gebiet der Bodenerosion, dargelegt. In den Diskussionen konnten weitere Anregungen für die Entwicklung der Produkte gewonnen werden. Die Inhalte und Ergebnisse des Workshops wurden in einer Dokumentation [DWD, 2016] festgehalten.

<p>Sehr geehrte Damen und Herren,</p> <p>das Thema Starkregen beschäftigt uns in vielen Bereichen: Bevölkerungsschützer sind bei schweren Ereignissen vor Ort, Stadt- und Raumplaner beschäftigen sich mit (baulichen) Vorsorgemaßnahmen, Meteorologen mit der Vorhersage und Rückbetrachtung von Ereignissen, Hydrologen müssen Entwässerungsanlagen effektiv bewirtschaften, Landwirte können von Erosionsschäden betroffen sein und Bürger müssen Eigenvorsorge betreiben.</p> <p>Vor allem kurzfristige und kleinräumige Starkregenereignisse können oftmals große Schäden mit sich bringen und stellen eine Gefahr für die Bevölkerung dar. Im Rahmen des Projektes „Radarklimatologie“ der Strategischen Behördenallianz aus BBK, BBSR, DWD, THW und UBA hat der Deutsche Wetterdienst eine hochaufgelöste Niederschlagsklimatologie auf Basis der vom DWD erhobenen Radarniederschlagsdaten seit 2001 erstellt. Grundlegende Fragen zur räumlichen Verteilung, Häufigkeit, Wiederkehr und Intensität extremer Niederschläge im Zeitraum 2001-2015 sollen nun damit beantwortet werden.</p> <p>Gerne möchten wir Ihnen im 2. Nutzerworkshop „Radarklimatologie“ unsere Ergebnisse aus dem Projekt vorstellen sowie Sie, als Nutzer dazu einladen diese gemeinsam mit uns zu diskutieren und mögliche Anwendungen anzustoßen.</p> <p><i>Die Projektpartner der Strategischen Behördenallianz</i></p>	<p>Workshop-Programm</p> <p><u>11.00 Uhr</u> Begrüßung und Vorstellung der Teilnehmer</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Dr. Tanja Winterrath (Projektleitung) <p><u>11.15 Uhr</u> Einführung in das Projekt „Radarklimatologie“</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Vorstellung der Projektpartner ▪ Projektvorstellung (DWD) <p>Präsentation der Projektergebnisse</p> <p><u>12.00 Uhr</u> MITTAGSPAUSE</p> <p><u>13.00 Uhr</u> Anwendungsmöglichkeiten der Projektergebnisse – Teil 1</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Impulsvorträge (vsl. aus den Fachrichtungen Siedlungsentwicklung und Wasserwirtschaft) und Diskussion <p><u>14.00 Uhr</u> KAFFEEPAUSE</p> <p><u>14.30 Uhr</u> Anwendungsmöglichkeiten der Projektergebnisse – Teil 2</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Impulsvorträge (vsl. aus den Fachrichtungen Katastrophenschutz und Landwirtschaft) und Diskussion <p><u>15.30 Uhr</u> Feedbackrunde der Behördenallianzpartner</p> <p><u>16.15 Uhr</u> Abschluss und Ausblick</p> <p>Ende der Veranstaltung gegen 16.45 Uhr</p>	<p>Anmeldung</p> <p>Zur verbindlichen Anmeldung schicken Sie bitte das beiliegende Anmeldeformular ausgefüllt bis zum 18.03.2016 an:</p> <p>Anna.Schmitt@dwd.de</p> <p>Die Teilnehmerzahl am Workshop ist begrenzt; die Plätze werden in der Reihenfolge der Anmeldung vergeben. Daher bitten wir Sie uns rechtzeitig zu informieren, wenn Sie kurzfristig verhindert sein sollten, um anderen Teilnehmern ein Nachrücken zu ermöglichen.</p> <p>Eine Anmeldegebühr wird nicht erhoben.</p> <p>Posterausstellung</p> <p>Es besteht die Möglichkeit thematisch passende Posterbeiträge (z.B. zu aktuellen Projekten) zum Workshop mitzubringen und vor Ort auszustellen.</p> <p>Sollten Sie Interesse daran haben, vermerken Sie dies bitte im entsprechenden Abschnitt auf dem Anmeldeformular damit wir Ihnen genug Ausstellungsfläche bieten können.</p>
--	--	---

Abbildung 2: Programm des 2. Nutzerworkshops am 21.04.2016 in Offenbach

3 Datengrundlage

a. Niederschlagsdaten des Radarmessnetzes

Mit einem Wetterradar können Niederschlagsteilchen in der Atmosphäre erfasst werden. Das Wetterradar erlaubt dabei eine kontinuierliche, zeitlich und räumlich hoch aufgelöste Abtastung der Atmosphäre, so dass sowohl Schauer schwacher Intensität als auch die vertikale Ausdehnung und Zuggeschwindigkeit von intensiven Gewitterzellen zuverlässig erfasst werden können. Das dem Messsystem zu Grunde liegende Prinzip „RADAR“ steht dabei für eine Abkürzung aus dem englischen „**RA**dio **D**etection **A**nd **R**anging“ mit der sinngemäßen deutschen Übersetzung „Erfassung und Entfernungszuordnung mit Funkwellen“. Unter Nutzung des „Doppler-Effekts“ kann mit den „Doppler-Wetterradarsystemen“ des DWD auch auf den Wind geschlossen werden. Polarimetrische Messungen erlauben die Erfassung von mikro-physikalischen Eigenschaften der Niederschläge.

Abbildung 3 zeigt beispielhaft links das Wetterradarsystem Offenthal, das auf einem ca. 45 m hohen Betonturm montiert ist. Das eigentliche Radarsystem wird durch die weiße „Radarkuppel“ (Radom) vor Witterungseinflüssen geschützt. Zum Schutz der Radartechnik und der Radarelektronik sind vier Blitzschutzstangen notwendig. Innerhalb des Betonturms befindet sich ein Radarkontrollraum, in dem die Radarsteuerung und der Sender untergebracht sind. Auf der rechten Seite ist ein Wetterradarsystem ohne schützende Radarkuppel zu sehen. Die in Azimut und Elevation bewegliche Antenne (der „Radarreflektor“, das Sende-/Empfangshorn mit seinen Haltestangen) ist, zusammen mit den notwendigen Gegengewichten, auf einem Standfuß montiert. Hinter dem Radarreflektor ist der Empfänger angebracht.

Der Sender des Wetterradars erzeugt Impulse hochfrequenter (C-Band) elektromagnetischer Wellen, die vom Radarkontrollraum aus zum Sende-/Empfangshorn geleitet werden und von diesem auf den Radarreflektor abgegeben werden. Als Teil der in Azimut und Elevation beweglichen Antenne bündelt (circa 1° „Antennen-Öffnungswinkel“) der Radarreflektor diese elektromagnetische Welle in eine bestimmte Raumrichtung. Die elektromagnetische Welle breitet sich nun in die vorgewählte Raumrichtung (Atmosphäre) aus und trifft dort auf (zum Beispiel) Niederschlagsteilchen. An den Niederschlagsteilchen wird ein sehr kleiner Teil der elektromagnetischen Welle wieder zurück zum Radarreflektor gestreut. Vom Sende-/Empfangshorn wird nun dieses sehr schwache Signal (das „Radar-Echo“) aufgenommen und zu einem sehr empfindlichen Empfänger geleitet. Der Empfänger verstärkt das empfangene Signal und wandelt es in einen digitalen Datenstrom, der weiter verarbeitet werden kann. Aus der bekannten Raumrichtung, in die der Radarreflektor zeigt und der bekannten Laufzeit zwischen Senden und Empfangen der elektromagnetischen Welle kann auf den genauen Ort der reflektierenden Objekte geschlossen werden. Mit der Intensität („Stärke“) des empfangenen Signals kann (zum Beispiel) auf die Intensität eines detektierten Niederschlagsereignisses geschlossen werden.

Die Bewegung der Wetterradar-Antenne in Azimut und Elevation dient zur kontinuierlichen, zeitlich und räumlich hoch aufgelösten Abtastung der Atmosphäre. Damit aus dem digitalen Datenstrom (einzelne Wetterradarmessungen) des Wetterradarsystems ein interpretierbares Produkt erzeugt werden kann, muss die Bewegung der Antenne koordiniert erfolgen. Dies wird mit einer, für alle Wetterradarsysteme des DWD gleichermaßen gültigen Scanstrategie sichergestellt. Entsprechend der Scanstrategie werden die Informationen aus allen Raumsegmenten alle fünf Minuten neu gewonnen. Die zeitliche Abfolge gibt vor, dass jeder Abtastzyklus mit einem bodennahen, orografiefolgenden Antennenumlauf, dem Niederschlags-scan, beginnt. Im Anschluss wird die Abtastung mit dem Volumenscan mit den festen Elevationen 5.5°, 4.5°, 3.5°, 2.5°, 1.5° und 0.5° sowie 8.0°, 12.0°, 17.0° und 25.0° durchgeführt.



Abbildung 3: Links: Wetterradarsystem Offenthal auf seinem circa 45 Meter hohen Betonturm. Das eigentliche Radarsystem wird durch das Radom vor Witterungseinflüssen geschützt. Weiterhin sind die vier Blitzschutzstangen zu sehen. Rechts: Ein Wetterradarsystem ohne schützende Radarkuppel. Die in Azimut und Elevation bewegliche Antenne ist, zusammen mit den notwendigen Gegengewichten, auf einem Standfuß montiert. Hinter dem Radarreflektor ist der Empfänger angebracht.

Der Abtastzyklus wird mit einem senkrecht nach oben schauenden 90-Grad-Scan, der für Kalibrierungszwecke verwendet wird, abgeschlossen. Im Rahmen der radarklimatologischen Auswertung wurde lediglich der Niederschlagsscan verwendet.

Der Deutsche Wetterdienst betreibt ein RadarNetzwerk bestehend aus derzeit 17 Radarstandorten sowie ein Forschungsradar am Standort Hohenpeißenberg. Mit der Installation des Radars in Dresden im Frühjahr 2000 vervollständigte sich das flächendeckende Beobachtungsmessnetz und ermöglicht die ständige Überwachung der Atmosphäre für nahezu das gesamte Bundesgebiet. Die Radarklimatologie setzt aus diesem Grund zum Zeitpunkt 01.01.2001 an und umfasst somit zum aktuellen Zeitpunkt 16 Jahre.

Radarhistorie

Die Qualität der Radargeräte hat sich im Laufe der Zeit geändert. Den ersten großen Schritt zur Verbesserung der Datenqualität brachte die Umstellung auf Doppler-Geräte. Durch Ausnutzung des Dopplereffekts war es nunmehr möglich, bewegte Hydrometeore von Festzielen zu unterscheiden, die die Niederschlagsmessung negativ beeinflussen. Die zweite Umstellung erfolgte von Single- auf Dual-Pol-Geräte. Durch die Messung in zwei Polarisationssebenen ist es möglich, die Form der Hydrometeore und damit ihre Phase und Größenverteilung besser zu bestimmen. Im Zuge dieser Umstellung wurden darüber hinaus einige Radarstandorte verlegt. Diese Verlegung betraf in erster Linie die innerstädtischen Standorte, da diese durch die urbane Bebauung besonders gestört waren. Die aktuellen Radargeräte sind vom Typ DWSR-5001C/SDP/CE und arbeiten mit einem 3-dB-Öffnungswinkel von $0,9^\circ$. Abbildung 4 zeigt die Zusammensetzung der Radarsysteme über den Zeitraum 2001 bis 2016.

Radarstandorte im Randbereich des Komposits, deren Messbereich nicht oder nur unzureichend von den benachbarten Radargeräten des Netzwerkes abgedeckt wird, wurden während der Umbauphase im Rahmen der Umstellung auf die Dual-Pol-Technologie durch den Aufbau eines mobilen Ausfallsicherungsradars (ASR) abgedeckt. Das Ausfallsicherungsradar ist ein komplettes, aber verlegbares C-Band-Doppler-Wetterradarsystem vom Typ

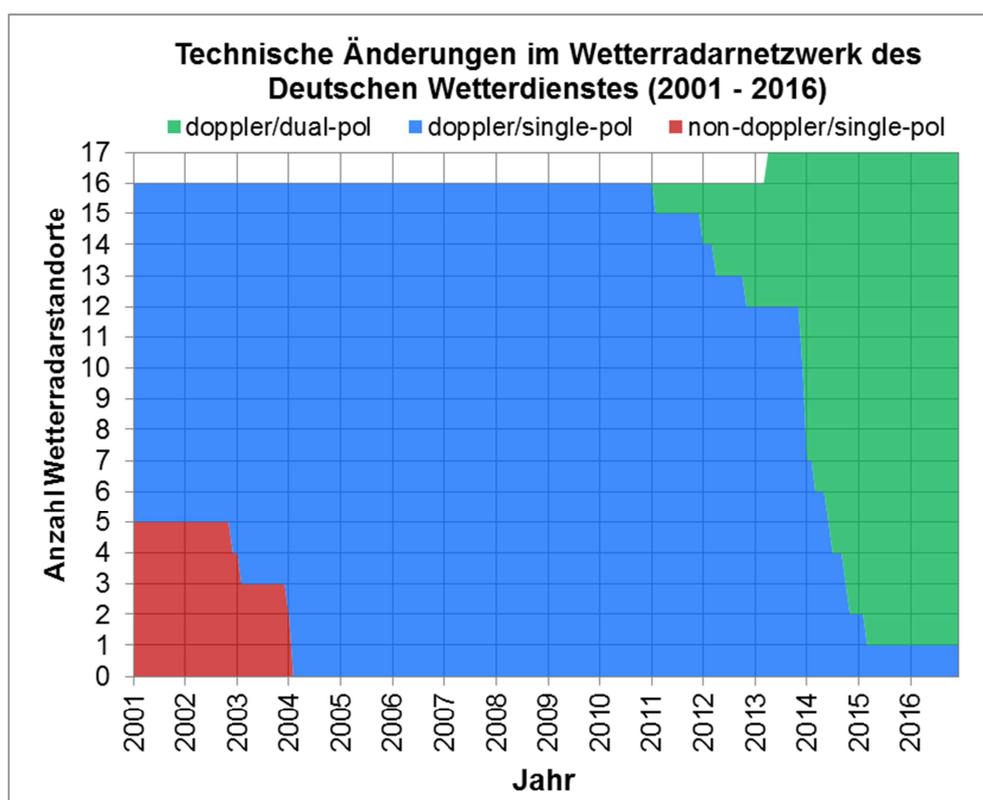


Abbildung 4: Technische Änderungen im Wetterradarverbund des Deutschen Wetterdienstes im Zeitraum 2001 bis 2016; rot: nicht-dopplerisierte Single-Pol-Geräte; blau: Doppler-Single-Pol; grün: Doppler-Dual-Pol.

DWSR-5001C der Firma EEC, das weitestgehend baugleich mit den neuen Verbundradargeräten ist. Jedoch besitzt das Radargerät eine kleinere Antenne (3-dB-Öffnungswinkel 1.6°) und arbeitet nur mit Single-Pol-Technik. Die gesamte Elektronik mit Sender, Empfänger, Steuerungsrechner und Kommunikation befindet sich in einem transportablen Container. Daher kann das System innerhalb von circa zehn Tagen an einem neuen Standort komplett aufgebaut und in Betrieb genommen werden. Die ASR wurden in einem geringen Abstand zum Altstandort auf einem mobilen Stahlgitterturm platziert. Zum Einsatz kam das ASR an den Standorten Essen (ESS/ASE), Feldberg (FBG/ASF), Rostock (ROS/ASW) und Dresden (DRS/ASD). Das Radar Neuheilenbach wurde während des Umbaus durch das belgische Radar Wideumont und das Radar Eisberg durch das tschechische Radar Brdy abgesichert. Beide ausländischen Radarstandorte gehen nicht in die Radarklimatologie ein. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Historie des DWD-Radarnetzwerks.

Tabelle 1: Überblick über die Historie des Radarverbundes des Deutschen Wetterdienstes (Stand: Radarreanalyse-Version 2017.002)

Standort	WMO-Nummer	Standortdaten (WGS84)	Non-Doppler	Doppler Single-Pol	Doppler Dual-Pol
Hamburg-Fuhlsbüttel (HAM)	10147	53.6212° N 9.9966° O 45.8 m ü. NN	07.06.1990	13.01.2004	
Boostedt (BOO)	10132	54.0044° N 10.0469° O 124.6 m ü. NN			23.01.2014
Rostock (ROS)	10169	54.1757° N 12.0581° O		02.01.1995	11.06.2014

Standort	WMO-Nummer	Standortdaten (WGS84)	Non-Doppler	Doppler Single-Pol	Doppler Dual-Pol
		37.0 m ü. NN			
ASR Rostock-Warnemünde (ASW)	10089	54.1731° N 12.1070° O 32.4 m ü. NN		30.09.2013	
Emden-Knock (EMD)	10204	53.3387° N 7.0238° O 58.0 m ü. NN		16.12.1994	<i>offen</i>
Hannover (HAN)	10338	52.4631° N 9.6983° O 80.8 m ü. NN		25.11.1994	
Hannover (HNR)	10339	52.4601° N 9.6945° O 97.7 m ü. NN			29.07.2014
Ummendorf (UMD)	10356	52.1601° N 11.1761° O 183.0 m ü. NN		25.06.1996	
Ummendorf (UMD)	10356	52.1601° N 11.1761° O 185.0 m ü. NN			17.12.2013
Berlin-Tempelhof (BLN)	10384	52.4778° N 13.3868° O 80.3 m ü. NN	14.03.1991	18.12.2002	
Prötzel (PRO)	10392	52.6487° N 13.8582° O 193.9 m ü. NN			23.01.2014
Essen-Bredenei (ESS)	10410	51.4056° N 6.9671° O 188.0 m ü. NN	21.03.1991	12.02.2004	
Essen-Bredenei (ESS)	10410	51.4056° N 6.9671° O 185.1 m ü. NN			11.04.2012
ASR Essen (ASE)	10412	51.4051° N 6.9638° O 188.0 m ü. NN		04.03.2010	
Flechtendorf (FLD)	10434	51.335° N 8.8525° O 584.6 m ü. NN	10.10.1997		
Flechtendorf (FLD)	10440	51.3112° N 8.802° O 623.0 m ü. NN		07.06.2004	12.11.2014
Dresden-Klotzsche (DRS)	10488	51.1245° N 13.7687° O 262.4 m ü. NN		24.03.2000	
Dresden-Klotzsche (DRS)	10488	51.1245° N 13.7687° O 263.4 m ü. NN			17.03.2015
ASR Dresden (ASD)	10487	51.1240° N 13.7635° O		31.07.2014	

Standort	WMO-Nummer	Standortdaten (WGS84)	Non-Doppler	Doppler Single-Pol	Doppler Dual-Pol
		261.0 m ü. NN			
Neuhaus am Rennweg (NEU)	10557	50.5001° N 11.1350° O 873.0 m ü. NN		01.12.1994	
Neuhaus am Rennweg (NEU)	10557	50.5001° N 11.1350° O 878.0 m ü. NN			10.01.2012
Neuheilenbach (NHB)	10605	50.1097° N 6.5485° O 585.8 m ü. NN		17.07.1998	27.03.2014
Frankfurt/Main (FRA)	10637	50.0233° N 8.5597° O 148.3 m ü. NN	28.03.1988	26.02.2003	
Frankfurt-Walldorf (FRI)	10630	50.0224° N 8.5585° O 186.8 m ü. NN		04.07.2007	
Offenthal (OFT)	10629	49.9847° N 8.7129° O 245.8 m ü. NN			15.02.2011
Eisberg (EIS)	10780	49.5407° N 12.4028° O 798.8 m ü. NN		18.09.1997	08.10.2014
Türkheim (TUR)	10832	48.5853° N 9.7828° O 767.6 m ü. NN		22.10.1998	09.12.2013
München (MUC)	10870	<i>Riem</i>	22.01.1992		
München-Fürholzen (MUC)	10871	48.3364° N 11.6117° O 511.4 m ü. NN	04.03.1998	04.02.2004	
Isen (ISN)	10873	48.1747° N 12.1018° O 677.8 m ü. NN			22.01.2014
Feldberg (FBG)	10908	47.8736° N 8.0036° O 1517.0 m ü. NN	20.06.1997		
Feldberg (FBG)	10908	47.8736° N 8.0036° O 1516.1 m ü. NN			20.11.2012
ASR Feldberg (ASF)	10907	47.8726° N 8.0068° O 1501.7 m ü. NN		13.06.2012	
Memmingen (MEM)	10950	48.0421° N 10.2192° O 724.4 m ü. NN			03.04.2013
Hohenpeißenberg (MHP)	10962	47.8015° N 11.0093° O 1006.2 m ü. NN	01.12.1996		01.03.2010

b. Niederschlagsdaten des Bodenmessnetzes

Das Messnetz des Deutschen Wetterdienstes umfasst sowohl automatische Ombrometer, die Niederschlagsmessungen in minütlicher Auflösung registrieren, als auch Tageswertstationen. Für die Aneicherung im Rahmen des operationellen RADOLAN-Verfahrens stehen ausschließlich die Echtzeitdaten der automatischen Stationen zur Verfügung. Im Rahmen der klimatologischen Aufbereitung der Daten konnten auch die Tageswerte mit Hilfe eines Disaggregierungsverfahrens (s. Abschnitt 4d.) in die Auswertung eingebracht werden. Dies ist insbesondere von großer Bedeutung, da im Jahr 2001 erst ca. 150 der insgesamt mehr als 4000 Stationen automatisiert waren. Heute ist rund die Hälfte der insgesamt noch ca. 2000 Stationen in Echtzeit verfügbar. Abbildung 5 zeigt die zeitliche Entwicklung der Automatisierung des Messnetzes (links) sowie die deutschlandweite Verteilung aller DWD-Stationen von 2001 bis heute, die in die Radarklimatologie eingeflossen sind.

Die Niederschlagsmessungen des DWD-Stationsmessnetzes unterliegen einer mehrstufigen Qualitätskontrolle, die Prüfungen auf Vollständigkeit sowie klimatologische, zeitliche, innere und räumliche Konsistenz umfasst. Die im Rahmen der klimatologischen Auswertung verwendeten automatischen Niederschlagsstationen haben die zeitnahe Datenprüfung vollständig durchlaufen. Die manuelle Prüfung der Tageswertstationen erfolgt hingegen mit einer zeitlichen Verzögerung, so dass die Radarklimalläufe sowohl geprüfte als auch ungeprüfte Daten verschiedener Qualitätsstufen enthalten. Nach aktuellem Stand sind die Tageswertdaten des Deutschen Wetterdienstes bis zum Jahr 2011 vollständig geprüft. Die Niederschlagszeitreihen werden im Rahmen des Projekts Radarklimatologie direkt in die Aneicherung übernommen. Es erfolgen weder eine Korrektur der witterungsabhängigen Messfehler, z. B. aufgrund einer Überwehung des Messgeräts [Richter, 1995], noch eine Homogenisierung der Zeitreihen.

Die Radarklimatologie wurde technisch so konzipiert, dass zusätzliche Niederschlagsstationsdaten über eine datenbankunabhängige Schnittstelle in das System eingebracht werden können. So ist potenziell eine Verdichtung des Messnetzes mit Daten aus Sondermessnetzen möglich.

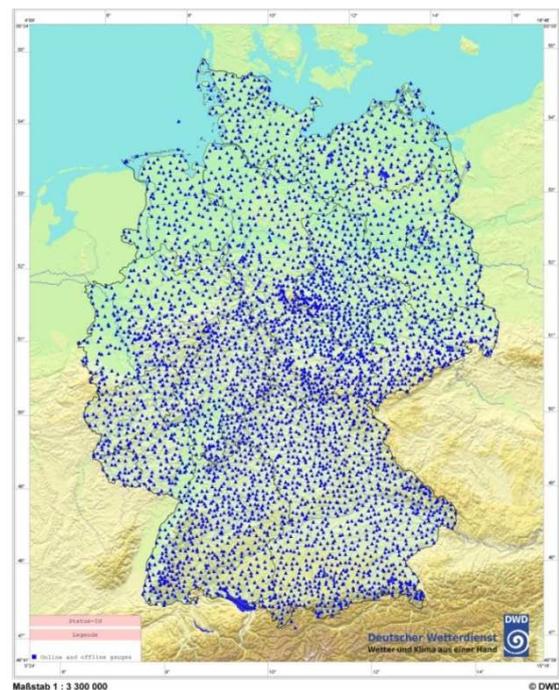
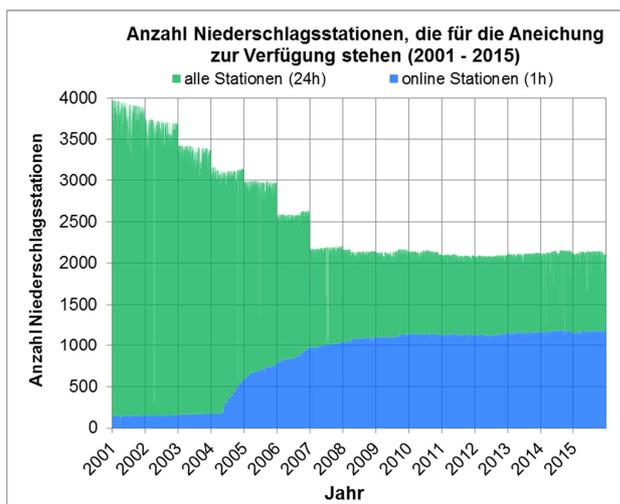


Abbildung 5: : Niederschlagsstationen des Messnetzes des Deutschen Wetterdienstes: *links*: Anzahl der Tageswert- (grün) und automatischen (blau) Niederschlagsstationen im Zeitraum 2001 bis 2015; *rechts*: Kartendarstellung für den Zeitraum 2001 bis heute.

4 Methodik

a. Korrekturverfahren auf Basis der lokalen Radardaten

Ein Radargerät sendet elektromagnetische Pulswellen mit einer Strahlweite von rund 1° in einem definierten Elevationswinkel aus und detektiert die rückgestreute Strahlung. Es handelt sich somit um Volumenmessungen in einem Kegelsegment. Mit zunehmender Entfernung vom Radargerät wächst das betrachtete Messvolumen und befindet sich in ansteigender Höhe über dem Grund, was in der Regel eine Reduktion des Signals zur Folge hat. Radarbasierte Messungen unterliegen darüber hinaus verschiedenen Einschränkungen. Die vom Radargerät ausgesandten Wellen werden nicht nur an den Hydrometeoren (Regentropfen, Eiskristalle, Hagel usw.) in der Atmosphäre sondern auch an nicht-meteorologischen Zielen reflektiert und gestreut. Hierbei handelt es sich zum Beispiel um Vögel oder Insekten, um Bauwerke, um Windkraftanlagen oder auch um exponierte Berggipfel. Die resultierenden Signale treten als verstreute singuläre Pixel mit hohen Werten auf und werden auch als Clutter bezeichnet. Nicht-bewegliche Ziele können hierbei unter Berücksichtigung des Dopplereffekts herausgefiltert werden, während bewegliche Ziele nicht eindeutig detektiert werden können. In beiden Fällen werden am betroffenen Pixel die Niederschlagsinformationen von den Fehlechos überprägt. Darüber hinaus wird der Bereich hinter den Hindernissen teilweise abgeschattet und somit nicht korrekt vermessen. Diese Segmente bezeichnet man als Negativspeichen. Im Gegensatz dazu treten auch Positivspeichen auf. Diese Segmente mit erhöhten Signalwerten werden durch externen Energieeintrag sogenannter Fremdstrahler hervorgerufen, insbesondere WLAN-Sender oder direkte Sonnenstrahlung bei Sonnenauf- oder -untergang. In sehr seltenen Fällen treten auch technische Störungen auf, die die gesamten Messergebnisse eines Standortes korrumpieren können.

Die oben genannten typischen Fehler treten insbesondere in Erscheinung, wenn die Messdaten über einen längeren Zeitraum summiert werden. Für die Wetterüberwachung und das Warnwesen sind sie zum größten Teil entweder leicht erkennbar und interpretierbar, oder sie spielen nur eine untergeordnete Rolle. Für die Analyse längerer Zeiträume muss aber unbedingt eine Korrektur vorgenommen werden. Aus einer nachträglichen erneuten Betrachtung („Reanalyse“) ergibt sich aber auch die Möglichkeit neue klimatologische Korrekturverfahren zu entwickeln und anzuwenden, da einerseits zeitlich nachfolgende Messschritte bereits bekannt sind und sich andererseits ein mittlerer Zustand ableiten lässt. Die im Rahmen des Projekts entwickelten und angewendeten Korrekturverfahren werden im Folgenden näher erläutert.

Artefaktkorrektur

Mit dem Ausbau des Wetterradarverbundes in Deutschland am Ende des 20. Jahrhunderts, entwickelte der Deutsche Wetterdienst auch Standardverfahren zur Erkennung von typischen Radarartefakten [Hassler et al., 2005; Hassler et al., 2006; Helmert und Hassler, 2006; Hengstebeck et al., 2010]. Die erkannten Artefakte werden in einer korrespondierenden Qualitätsdatei (z. B. DQ-Produkt) hinterlegt. Die Verfahren basieren in erster Linie auf Mustererkennungsalgorithmen, der Häufigkeit des Auftretens starker Signale (Blacklist) und dem Abgleich mit dem Doppler-Windfeld. Darüber hinaus wurden im Projekt weitere zusätzliche Verfahren zur Erkennung von Radarartefakten angewendet.

Das zweistufige Verfahren nach Gabella und Notarpietro (2002) identifiziert anhand der Textur des Niederschlagsfeldes im ersten Schritt einzelne Pixel mit überhöhten Signalen und im zweiten Schritt Niederschlagsgebiete mit unnatürlicher Geometrie, wie sie zum Beispiel bei Positivspeichen entstehen. Zusätzlich erfolgt eine Plausibilisierung der Radardaten mit den jeweils aktuellen atmosphärischen Gegebenheiten. Es kann davon ausgegangen werden, dass sehr hohe Reflektivitätswerte in den mittleren Breiten nur in Verbindung mit konvektiven Wettererscheinungen wie Gewittern vorkommen. Aus diesem Grund wurde geprüft, ob Re-

flektivitätswerte größer 55 dBZ in zeitlicher (± 7 min) und räumlicher (Radius von 10 km) Nähe zu Blitzen auftreten. Ist dies nicht der Fall, so muss davon ausgegangen werden, dass es sich um ein Signal nicht-meteorologischen Ursprungs handelt. Außerdem wurde die natürliche zeitliche Variabilität von Niederschlag an jedem Radarmesspunkt geprüft. Man kann davon ausgehen, dass in Deutschland kein anhaltender, starker Niederschlag an einem Punkt über einen Zeitraum von mehreren Tagen auftritt. Wird hingegen ein Radarmesspunkt zu oft mit Niederschlagssignalen belegt, dann ist in dem Fall auch von Fehlechos auszugehen. An Messpunkten mit bekannten Störobjekten (Sendemasten, Windkraftanlagen usw.) kann der Schwellenwert zur Filterung auch geringer angesetzt werden. Zur Aufbereitung der Radardaten in diesem Projekt wurden für den statistischen Filter folgende Einstellungen genutzt:

- Zeitfenster ± 48 h (mit doppelter Wichtung des Zeitfensters ± 24 h)
- Schwellenwert zur Filterung beim Überschreiten der Belegungshäufigkeit von 95 % im Nahbereich (bis 50 km Entfernung) bzw. 80 % im Fernbereich
- Schwellenwert zur Filterung beim Überschreiten der Belegungshäufigkeit von 70 % im Nahbereich (bis 50 km Entfernung) bzw. 60 % im Fernbereich an Messpunkten mit bekannten Störobjekten

Zusätzlich zu den Verfahren, die als Post-Prozess angewendet werden, erfolgt bereits am Radarstandort eine Signalfilterung, wobei zu starke Signale auf $-32,5$ dBZ (entspricht $0,0$ mm/h) gesetzt wurden. Im Summenbild können somit vereinzelt „Löcher“ (Reverse Speckle) im Niederschlagsfeld entstehen. Diese können in der Datenaufbereitung, analog zur Erkennung von Cluttern, mit Methoden der Mustererkennung oder auf Basis der Belegungsstatistik erkannt werden.

Alle Verfahren zur Erkennung von Artefakten werden parallel und nicht sequenziell angewendet. Dies soll verhindern, dass durch mehrere aufeinanderfolgende Filterungsschritte tatsächliche meteorologische Extremereignisse gefiltert werden.

Korrektur der entfernungs- und höhenabhängigen Signalreduktion

Bei Betrachtung langjähriger Summen lokaler Radardaten fällt auf, dass mit zunehmender Entfernung vom Radarstandort die Niederschlagssumme deutlich abnimmt. Dies ist insbesondere im Winter sehr auffällig. Bei großen Elevationswinkeln, wie sie am Standort Dresden in Richtung SSW auftreten, ist die Reduktion besonders ausgeprägt (Abbildung 6b und Abbildung 6c). Diese entfernungs- und höhenabhängige Signalreduktion wird durch die Kombination mehrerer Effekte hervorgerufen und insbesondere durch den Elevationswinkel des Radarstrahls beeinflusst.

Je weiter sich der Radarstrahl von seinem Ausgangsort entfernt, desto größer wird der Abstand zwischen Radarstrahl und Erdoberfläche. Verstärkt wird dieser Effekt noch durch die Erdkrümmung. Am Beispiel des Radars Dresden ist zu erkennen, dass sich der Radarstrahl bei einer Entfernung von 100 km vom Radarstandort bereits in einer Höhe zwischen 2000 m und 3000 m befindet (Abbildung 6c). Niederschlagsgebiete, die nur eine geringe vertikale Ausdehnung besitzen, können ab einer gewissen Entfernung nur noch teilweise oder überhaupt nicht mehr durch den Radarstrahl erfasst werden („Overshooting“-Effekt). Dieser Effekt tritt verstärkt im Winter bei geringeren Wolkenhöhen auf. Zusätzlich hängt die Reflektivität von der Phase des Niederschlags ab. Feste Hydrometeore, die vermehrt in den höheren Atmosphärenschichten oberhalb der 0°C -Grenze auftreten, besitzen ein geringeres Reflektivitätsvermögen als flüssige, was zu einer systematischen Unterschätzung des Niederschlags führt. Des Weiteren führt die Niederschlagsdämpfung durch vorgelagerte Niederschlagsgebiete zu einer Reduzierung der gemessenen Reflektivität am betrachteten Messort. Darüber hinaus vergrößert sich das vom Radar erfasste Volumen, so dass es vorkommen kann, dass

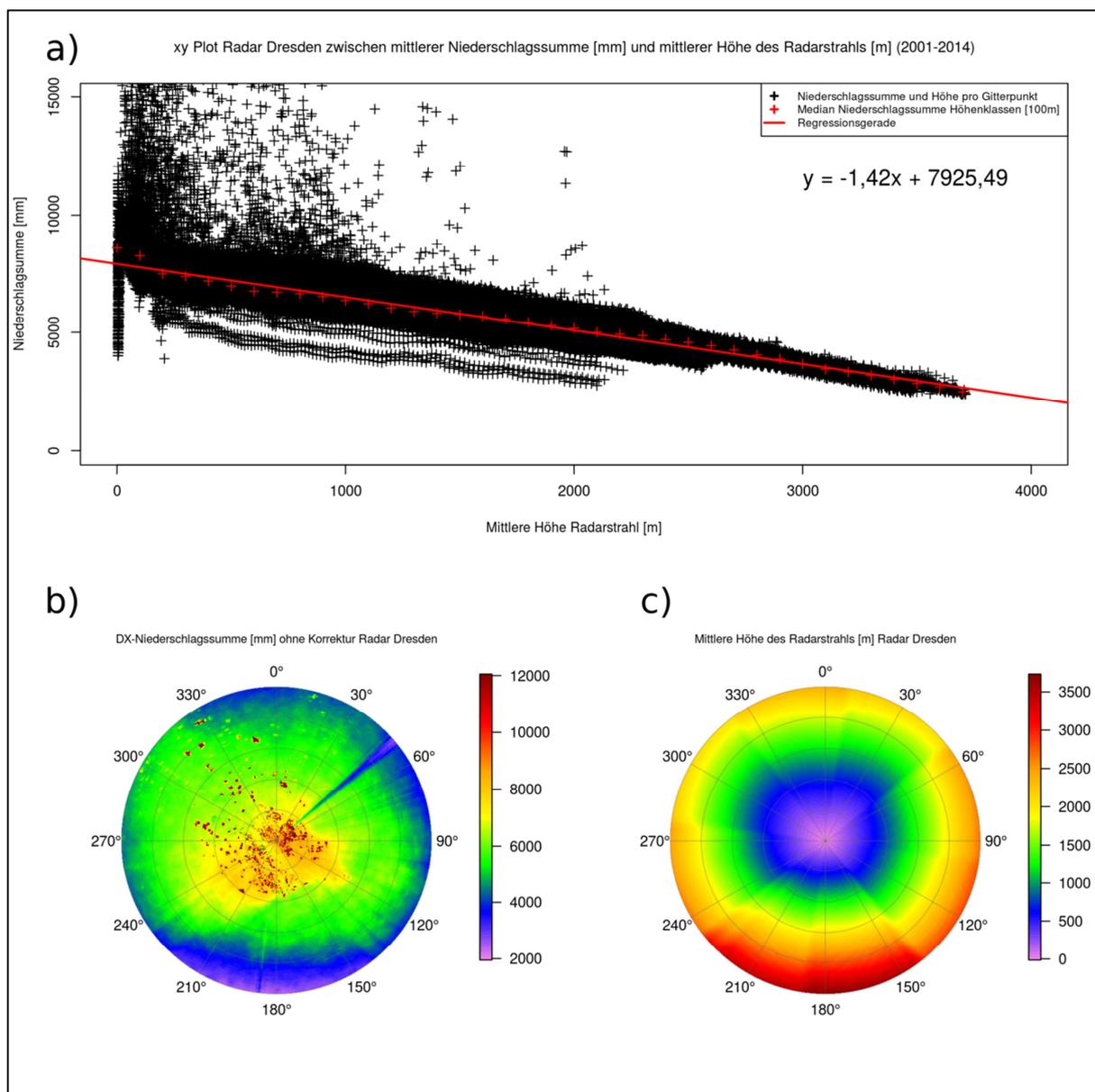


Abbildung 6: Entfernungs- und höhenabhängige Signalreduktion am Beispiel des Radarstandortes Dresden (2001-2014), a) Abhängigkeit der mittleren Niederschlagssumme von der zugehörigen mittleren Höhe des Radarstrahls für jeden Gitterpunkt (1 km x 1 °), b) mittlerer Niederschlag ohne Korrektur, c) mittlere Höhe des Radarstrahls

Niederschlag in größerer Entfernung nicht das gesamte Messvolumen ausfüllt und somit in seiner maximalen Intensität unterschätzt wird. Somit unterliegen Niederschlagswerte, die in unterschiedlichen Entfernungen vom Radarstandort sowie unterschiedlichen Messhöhen gemessen werden, verschiedenen Einflüssen auf das Messergebnis. In der Addition der genannten Effekte nimmt der detektierte Niederschlag mit der Entfernung vom Radar und der zunehmenden Messhöhe ab. Dies kann zur Folge haben, dass selbst auffällige klimatologische Effekte, wie eine Niederschlagsverstärkung an einem Gebirge, nicht mehr sichtbar sind. Um solche Effekte abzuschwächen, wird in Deutschland ein sehr dichtes Wetterradarnetz mit großen Überlappbereichen verwendet. Dies hat den Vorteil, dass ein Ereignis innerhalb von Deutschland mit großer Wahrscheinlichkeit von mehreren Radargeräten erkannt wird, auch wenn ein Radargerät vorübergehend ausfällt. Insbesondere in den grenznahen Gebieten gibt

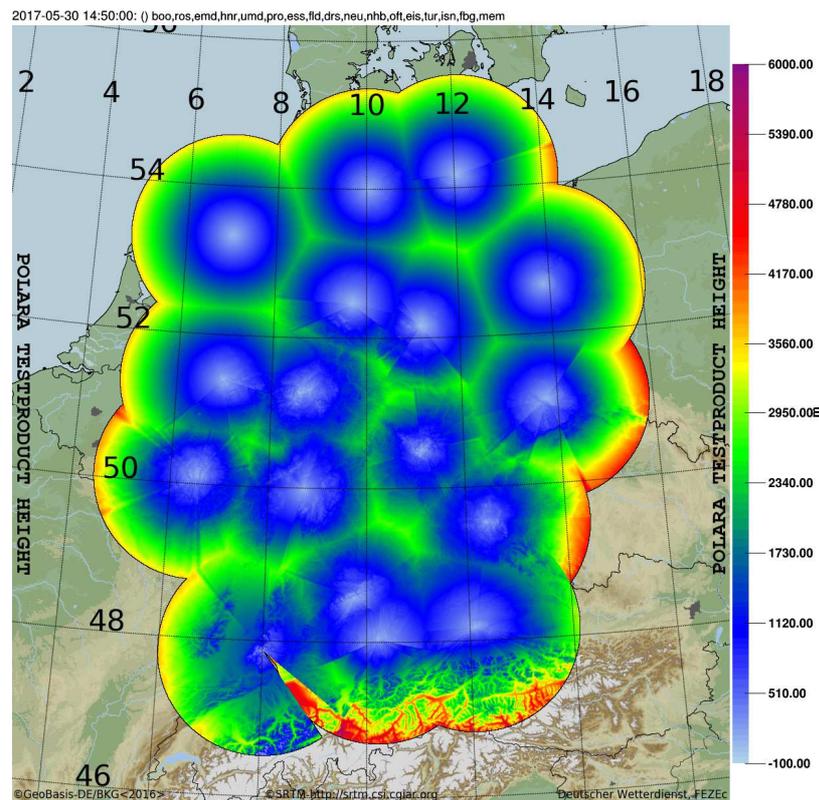


Abbildung 7: Minimale Höhe der Radarmessung über Grund im Kompositum am Beispiel des POLARA-Testprodukts vom 30. Mai 2017, 14:50 UTC.

es auch schwächer abgedeckte Bereiche, in denen der Radarstrahl im Mittel recht hoch ist, wie zum Beispiel im Raum Leipzig oder im Raum Nürnberg (Abbildung 7).

Im Folgenden wird zur Verdeutlichung des Effekts das einfache lineare Regressionsverfahren nach Wagner et al. (2012) vorgestellt. Anschließend wird das im Rahmen des Projekts entwickelte, erweiterte Verfahren auf der Basis einer multiplen polynomischen Regression zur Korrektur der höhenabhängigen Niederschlagsreduktion detailliert beschrieben.

Einfaches lineares Regressionsverfahren

Abbildung 6a zeigt die Niederschlagssumme am Radar Dresden über die Jahre 2001-2014 in Abhängigkeit der Messhöhe. Für das langjährige Mittel lässt sich dieser Effekt mit Hilfe einer linearen Funktion beschreiben und ebenfalls korrigieren [Wagner et al., 2012]. Die starke Streuung im Nahbereich des Radars ist auf eine Häufung von Clutterpixeln zurückzuführen. Eine weitere Ursache für eine Überschätzung des Niederschlags stellen Messungen im Höhenbereich der Schmelzschicht dar, die in den hier verwendeten Radardaten nicht korrigiert wurden. Die „Streifen“, die eine Unterschätzung des Niederschlags aufweisen, sind auf Negativ-Speichen zurückzuführen.

Abbildung 8 zeigt den Vergleich zwischen der vom Radar gemessenen Niederschlagssumme (Abbildung 8a) und der nach Anwendung der linearen Korrekturfunktion korrigierten Niederschlagssumme (Abbildung 8b) für das Radar Dresden. Deutlich zu sehen ist die beachtliche Zunahme der Niederschlagssumme in Regionen, die sich in einer größeren Entfernung zum Radarstandort befinden. Vor allem die erhöhten Niederschlagsmengen des Erz- und Riesengebirges (im Südwesten bzw. Südosten), die sich deutlich vom Umland abheben, sind nun sichtbar und entsprechen einem realistischeren Bild, das durch langjährige Stationszeitreihen belegt ist.

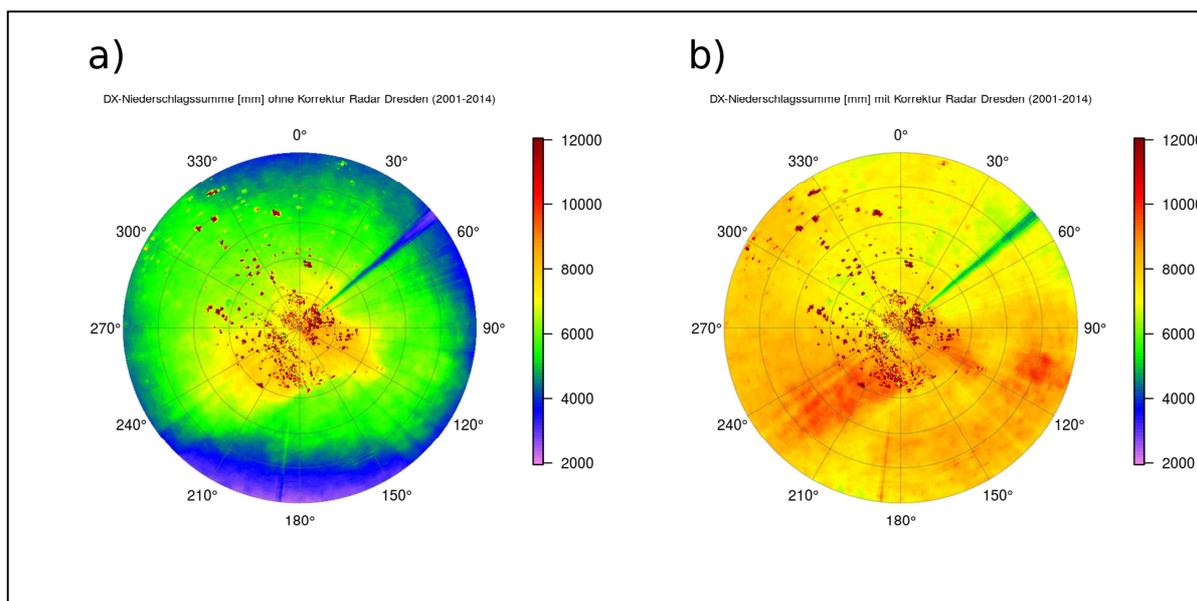


Abbildung 8: Niederschlagssumme (2001-2014) am Radar Dresden ohne (a) und mit (b) Korrektur der höhenabhängigen Signalreduktion.

Multiples polynomisches Regressionsverfahren

Das lineare Verfahren ist gut geeignet, um Jahressummen des Niederschlags zu korrigieren. Betrachtet man die Ergebnisse jedoch detaillierter – z. B. zur Untersuchung einzelner extremer Niederschlagsereignisse – so zeigt sich, dass die Signalreduktionen in Abhängigkeit von der speziellen Wittersituation großen Variationen unterliegen. Dies entspricht aufgrund der dargelegten physikalischen Ursachen der Effekte den Erwartungen. Während das Overshooting, also das Verfehlen eines Niederschlags, insbesondere bei niedriger Bewölkung vor allem in den Wintermonaten auftritt, erstrecken sich intensive konvektive Zellen, die insbesondere im Sommerhalbjahr auftreten, über einen großen Höhenbereich und werden – wenn auch in unterschiedlichen Höhenbereichen der Zelle – detektiert. Eine allgemeine Korrektur kann somit im Mittel eine sehr gute Korrektur erzielen, im Einzelfall aber zu fehlerhaften Ergebnissen führen. Aufgrund dieser Überlegungen wurde die Korrekturfunktion um die Abhängigkeit von der Jahreszeit und der Reflektivität (dBZ-Klasse) erweitert und für definierte Höhenklassen über eine multiple polynomische Regression bestimmt.

Zur Bestimmung der Korrekturfaktoren wurde eine Einteilung der Pixel in 13 Höhenklassen zwischen 0 m und 6000 m in 500-Meter-Schritten vorgenommen. Die Niederschlagswerte werden wiederum für fünf Reflektivitätsklassen separat betrachtet, wobei die Schwellwerte so gewählt sind, dass die Belegungen der einzelnen Klassen ausreichen, um statistische Auswertungen durchzuführen:

- Klasse 1:]1,19] dBZ
- Klasse 2:]19,28] dBZ
- Klasse 3:]28,37] dBZ
- Klasse 4:]37,46] dBZ
- Klasse 5: > 46 dBZ.

Als zwei jahreszeitliche Klassen wurden die Sommer- und Winterhalbjahre festgelegt.

Die Datenanalyse umfasst folgende Schritte:

- Pixelweise Umrechnung der Reflektivitätswerte über die Standard-Z-R-Beziehung in Niederschlagswerte
- Pixelweise Bestimmung der mittleren, monatlichen Niederschlagssummen für die Sommer- (April-September) und Winterhalbjahre (Oktober-März) des gesamten Reanalysezeitraums separat für jede dBZ-Klasse
- Pixelweise Bestimmung der mittleren Radarstrahlhöhe für die Sommer- (April-September) und Winterhalbjahre (Oktober-März) des gesamten Reanalysezeitraums
- Bestimmung des Medians der mittleren Monatssumme pro Halbjahr über alle Pixel einer Höhenklasse → Die Verwendung des Medians reduziert den Einfluss fehlerhafter Messungen, z. B. durch Speichen, auf das Ergebnis.
- Normierung des Medians über alle dBZ-Klassen am Radarstandort (erste Höhenklasse) → Die Normierung gewährt eine Vergleichbarkeit der einzelnen dBZ-Klassen für die Regression und eliminiert den Einfluss der unterschiedlichen Niederschlagsmengen pro Reflektivitätsklasse.

Tabelle 2 und Tabelle 3 zeigen beispielhaft die Ergebnisse am Beispiel des Single-Pol-Radars Dresden für das Winterhalbjahr.

Tabelle 2: Mediane der mittleren Monatssumme des Niederschlags [mm] im Winterhalbjahr über alle Pixel einer Höhenklasse für fünf dBZ-Klassen am Beispiel des Radars Dresden.

	0- 500m	500- 1000m	1000- 1500m	1500- 2000m	2000- 2500m	2500- 3000m	3000- 3500m	3500- 4000m	>4000m
dBZ Klasse 1	9.17	9.31	8.86	7.94	6.91	5.84	4.47	3.63	NA
dBZ Klasse 2	14.80	13.18	9.84	6.58	4.14	2.41	1.29	0.79	NA
dBZ Klasse 3	10.98	8.90	5.47	2.95	1.55	0.86	0.66	0.58	NA
dBZ Klasse 4	6.31	3.56	2.67	2.00	1.84	1.88	1.83	2.03	NA
dBZ Klasse 5	5.55	4.96	5.27	4.73	5.14	5.14	4.73	4.03	NA

Tabelle 3: Auf die erste Höhenklasse normierte Mediane der mittleren Monatssumme des Niederschlags im Winterhalbjahr über alle Pixel einer Höhenklasse für fünf dBZ-Klassen am Beispiel des Radars Dresden.

	0- 500m	500- 1000m	1000- 1500m	1500- 2000m	2000- 2500m	2500- 3000m	3000- 3500m	3500- 4000m	>4000m
dBZ Klasse 1	100	101.53	96.71	86.54	75.40	63.68	48.70	39.55	NA
dBZ Klasse 2	100	89.10	66.52	44.50	27.98	16.30	8.70	5.33	NA
dBZ Klasse 3	100	81.00	49.84	26.86	14.10	7.86	6.02	5.26	NA
dBZ Klasse 4	100	56.45	42.21	31.62	29.20	29.73	29.06	32.14	NA
dBZ Klasse 5	100	89.49	94.92	85.40	92.61	92.61	85.33	72.62	NA

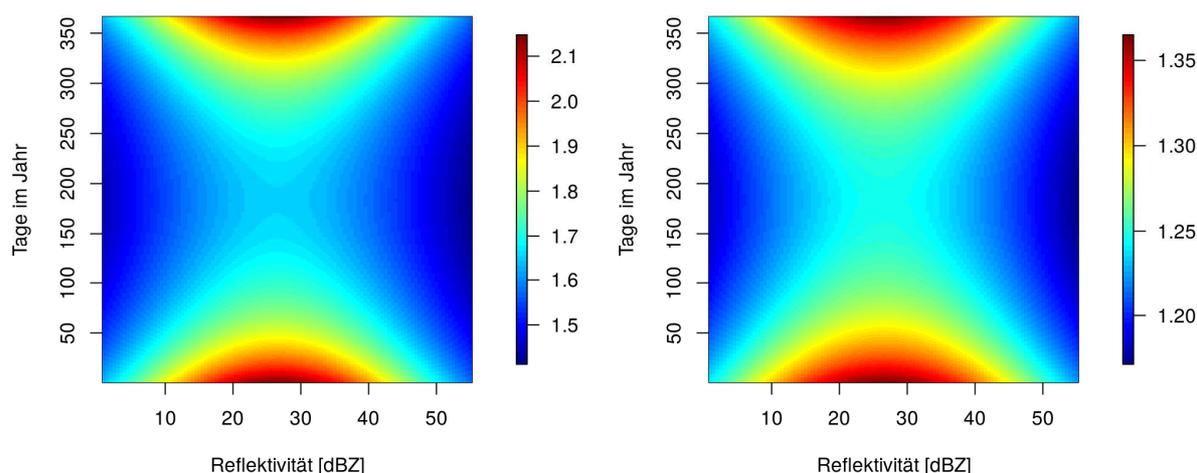


Abbildung 9: Korrekturfaktoren als Ergebnis der Multiplen Polynomischen Regression für die Höhen 2000 m (links) und 1000 m (rechts) am Beispiel des Radars Essen.

Um eine konsistente Korrekturfunktion über den gesamten Parameterbereich zu erhalten, wird eine Regression über die Ergebnisse der Klassen (Punkte im dreidimensionalen Raum) durchgeführt. Diese multiple polynomische Regression zur Bestimmung der Korrekturfaktoren für die Höhenabhängigkeit erfolgt über folgende Gleichung:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_1^2 + b_3x_2 + b_4x_2^2 + b_5x_3$$

mit b_x = Koeffizienten, x_1 = dBZ-Klassen, x_2 = Tage im Jahr (Jahreszeit) und x_3 = Höhenklassen.

Dabei wurde für die dBZ-Klassen ein Polynom 2. Grades bestimmt, da sich zeigt, dass die Abnahme des Niederschlags mit Zunahme der Höhe für kleine dBZ-Klassen (Klasse 1) schwächer ausfällt, anschließend deutlich zunimmt (Klasse 2 und 3) und sich dann wieder abschwächt (Klasse 4 und 5) – wir erhalten somit eine Struktur „niedrig-hoch-niedrig“, wozu sich ein Polynom 2. Grades am besten zur Anpassung eignet. Für die Jahreszeiten (Tage im Jahr) wurde ebenfalls ein Polynom 2. Grades bestimmt, da im Winter deutlich stärkere Abnahmen des Niederschlags mit größerer Entfernung zum Radarstandort zu beobachten sind als im Sommer – wir erhalten somit ebenfalls eine Struktur „niedrig-hoch-niedrig“. Für die Höhe des Radarstrahls wurde ein Polynom 1. Grades bestimmt, da es sich hier in der Regel um eine näherungsweise lineare Abnahme handelt.

Abbildung 9 zeigt beispielhaft die Korrekturfaktoren in Abhängigkeit vom Julianischen Tag und der Reflektivität für eine ausgewählte Höhenklasse (zweidimensionaler Schnitt durch den dreidimensionalen Werteraum). Betrachtet man die Ergebnisse auf einer Linie entlang des Julianischen Tages, so zeigt sich, dass die Korrekturfaktoren im Winter höhere Werte annehmen als im Sommer. In Bezug auf die Reflektivität (Intensität des Niederschlags) ergeben sich die höchsten Werte bei mittleren Werten von 20-35 dBZ. Ein Vergleich der Ergebnisse für die Höhen von 2000 m und 1000 m zeigt die Zunahme der Korrekturfaktoren mit der Höhe, wie sie bereits im linearen Regressionsansatz zu erkennen war. Der Ansatz liefert konsistente und stetige Korrekturfaktoren und erlaubt die spezifische Korrektur einzelner Pixelmesswerte in Abhängigkeit von Messdatum, Messhöhe und Intensität des Niederschlags.

Da das Signal in einzelnen Fällen auf null reduziert wird, so dass keine Information als Basis für die Korrektur vorhanden ist, ist in diesen Fällen keine Korrektur der Daten möglich. Diese Fälle treten insbesondere in großen Höhen und im Winter auf. Das Korrekturverfahren führt jedoch insgesamt zu einer deutlichen Verbesserung der Niederschlagsdaten.

Speichenkorrektur

Allgemeine Korrektur einer Negativ-Speiche

Bei Negativ-Speichen handelt es sich um vom Radarstandort wegführende Sektoren mit einheitlich zu niedrigen Signalen infolge von Abschattung durch bzw. Ausblendung von Störobjekten im Signalverlauf des Radars. Je nach Größe des Störobjektes und Entfernung vom Radar sind ein oder mehrere Azimutwinkel mehr oder minder gestört. Im Radarbild des Standorts Hamburg (Abbildung 11) sind beispielsweise einige sehr ausgeprägte Speichen zu erkennen, in deren Bereich die Dämpfung nahezu vollständig ist. An anderen Standorten treten Negativ-Speichen nur latent auf, da das Signal nur schwach gedämpft wird und sie in den einzelnen Stunden- und Tagessummen nur schwer oder gar nicht erkennbar sind, sowohl für das menschliche Auge als auch für automatische Erkennungsalgorithmen. Aus diesem Grund ist die Bestimmung einer Korrektur der Speichen nur auf der Basis von Niederschlagssummen möglich. Dieser Methode widerspricht die Tatsache, dass manche Speichen nur zeitweise auftreten. Eine mögliche Ursache stellt z. B. ein Baukran dar, der nur vorübergehend aufgebaut ist und die Ausbreitung des Radarstrahls behindert. Für die Bestimmung der allgemeingültigen Korrektur der Speichen, wurden diese Randbedingungen berücksichtigt.

Eine direkte Interpolation der Information aus benachbarten ungestörten Messsektoren ist an dieser Stelle nicht zielführend, da diese einerseits die Niederschlagsstruktur verändern und es andererseits zum Verschmieren der Werte und damit auch möglichen Fehlechos kommen kann (Scheibenwischer-Effekt). Die für das Projekt entwickelte Methode basiert auf dem Verfahren von Jacobi et al. (2014). Die Annahme bei dieser Methode besteht darin, dass innerhalb des Speichensegments keine komplette Auslöschung, sondern nur eine starke Dämpfung des Signals erfolgt. Über den Vergleich der Niederschlagssummen innerhalb der Speiche und in den angrenzenden ungestörten Segmenten wird ein Korrekturfaktor bestimmt und angewendet. Die Funktionalität dieser Methode wurde beispielhaft anhand der Korrektur einer einzelnen Speiche in der Gesamtniederschlagssumme von Januar 2001 bis Juli 2014 am Standort Dresden getestet (Abbildung 10).

Abbildung 10a zeigt die unkorrigierte Niederschlagssumme, die aus den lokalen DX-Produkten unter Anwendung der Standard-Z-R-Beziehung berechnet wurde. Darin wird nach Nordost eine Negativ-Speiche sichtbar. Die größte Abschwächung ist bei einem Azimutwinkel von 49° zu finden. Die Speiche erstreckt sich dann noch ca. 2° nach links und rechts. Abbildung 10c zeigt den Signalverlauf des Mittelstrahls (49° , blau) und der beiden angrenzenden, noch unbeeinflussten Strahlen auf der linken (46° , grün) und rechten (52° , rot) Seite. Das Originalsignal des Mittelstrahls ist gepunktet dargestellt.

Zu Beginn wird der Median des Signals entlang des rechten und linken Randstrahls bestimmt. Dabei wird nur das Signal in einer Entfernung von 30 bis 100 km vom Radarstandort berücksichtigt, da in diesem Entfernungsbereich die Qualität der Messung am besten ist. Dieser Median wird nun im Bereich der Speiche vom linken zum rechten Randstrahl interpoliert. Diese interpolierten Werte und die realen Medianwerte der von der Speiche betroffenen Strahlen werden nun ins Verhältnis gesetzt und für die betroffenen Strahlen jeweils ein Verstärkungsfaktor bestimmt. Zum Schluss werden alle Werte eines betroffenen Strahles mit dem für diesen Strahl ermittelten Verstärkungsfaktor multipliziert. In Abbildung 10c ist der korrigierte Signalweg des Mittelstrahls als durchgezogene, blaue Linie dargestellt. Das Ergebnis des gesamten Prozesses zeigt Abbildung 10d.

Der Vorteil dieser Methode ist, dass das vorhandene Signal genutzt und nur verstärkt wird und damit die vorhandene Niederschlagsverteilung erhalten bleibt. Der durch diese Methode ermittelte Verstärkungsfaktor ist bis zu einem gewissen Grad zeitlich unabhängig nutzbar, das heißt, er kann bereits auf die lokalen 5-Minuten-Daten angewendet werden.

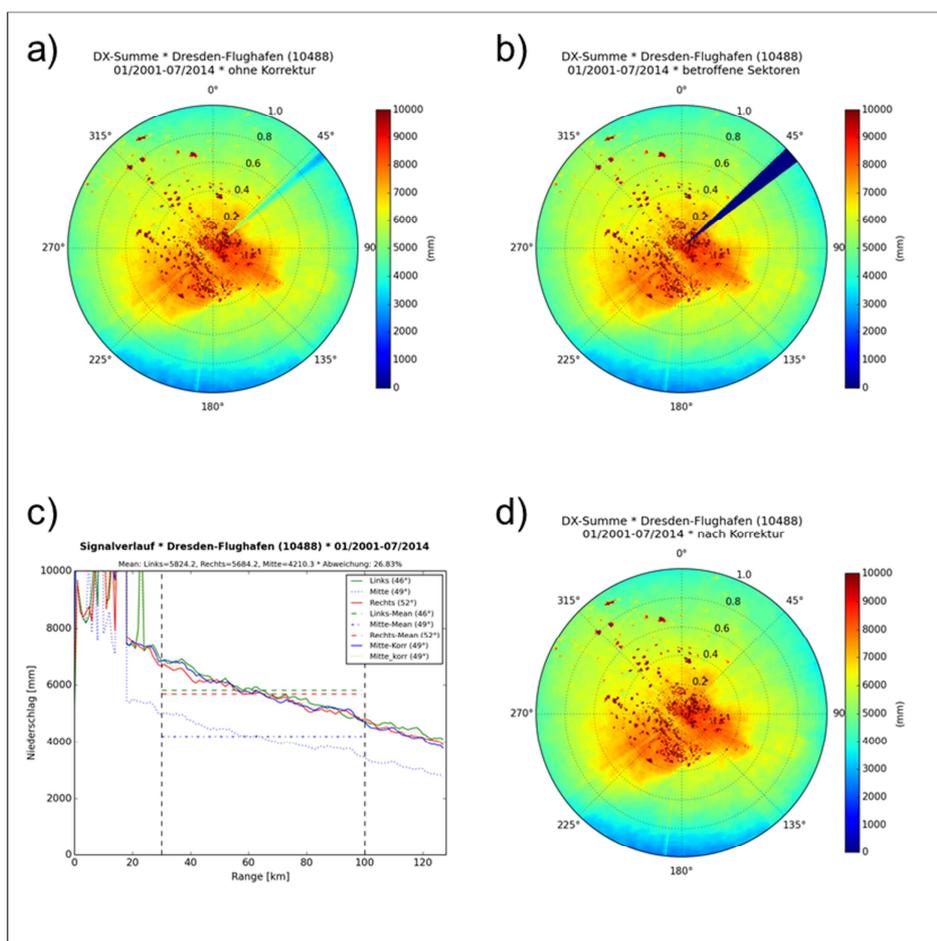


Abbildung 10: Korrektur einer Negativspeiche nach Jacobi et al. (2014) am Beispiel des Radars Dresden.

Das Ergebnis zeigt, dass die Methode eine effektive Korrektur der Speichen bewirkt. Aufgrund der Vielzahl an auftretenden Negativ-Speichen und deren variablen Ausprägung war es jedoch notwendig, ein automatisiertes Verfahren zur Detektion der einzelnen Speichen zu entwickeln, da mit einer manuellen Identifizierung jeder einzelnen Speiche ein nicht zu vertretender zeitlicher Aufwand verbunden wäre.

Automatische Detektion und Korrektur von Negativ-Speichen

Um Negativ-Speichen automatisiert zu detektieren, wird zunächst das Signal entlang des Azimuts (1-360°) in Form des Zentralwerts des Signalverlaufs bestimmt. Hierzu wurde in einem ersten Ansatz der Median über 30-100 km Entfernung vom Radarstandort verwendet, da das Signal in diesem Entfernungsbereich wenigen Störungen unterliegt, die das Ergebnis beeinflussen könnten. Es wird angenommen, dass abrupte und signifikante Signalverluste in einzelnen Sektoren nicht natürlichen Ursprungs sind und durch eine Abschattung des Radarstrahls verursacht werden. Für die Berechnung des passenden Korrekturfaktors wird methodisch auf das Prinzip der „Einhüllenden“ (Envelope) zurückgegriffen, die den unbeeinträchtigten Signalverlauf repräsentieren soll. Da der Signalverlauf bei allen lokalen Radarstandorten je nach Wettersituation natürliche Schwankungen aufweist und durch keine einfache Funktion beschrieben werden kann, wurde ein variables Verfahren entwickelt, das geeignete Stützpunkte für eine spätere Interpolation der Einhüllenden identifiziert.

Zunächst entspricht die Einhüllende dem originalen azimutalen Signalverlauf. Das Signal wird dann auf lokale Minima und Maxima sowie Durchgangs- und Wendepunkte analysiert. Im Bereich des Nordsprungs (von 360° zu 1°) wird eine geeignete Randwertbetrachtung

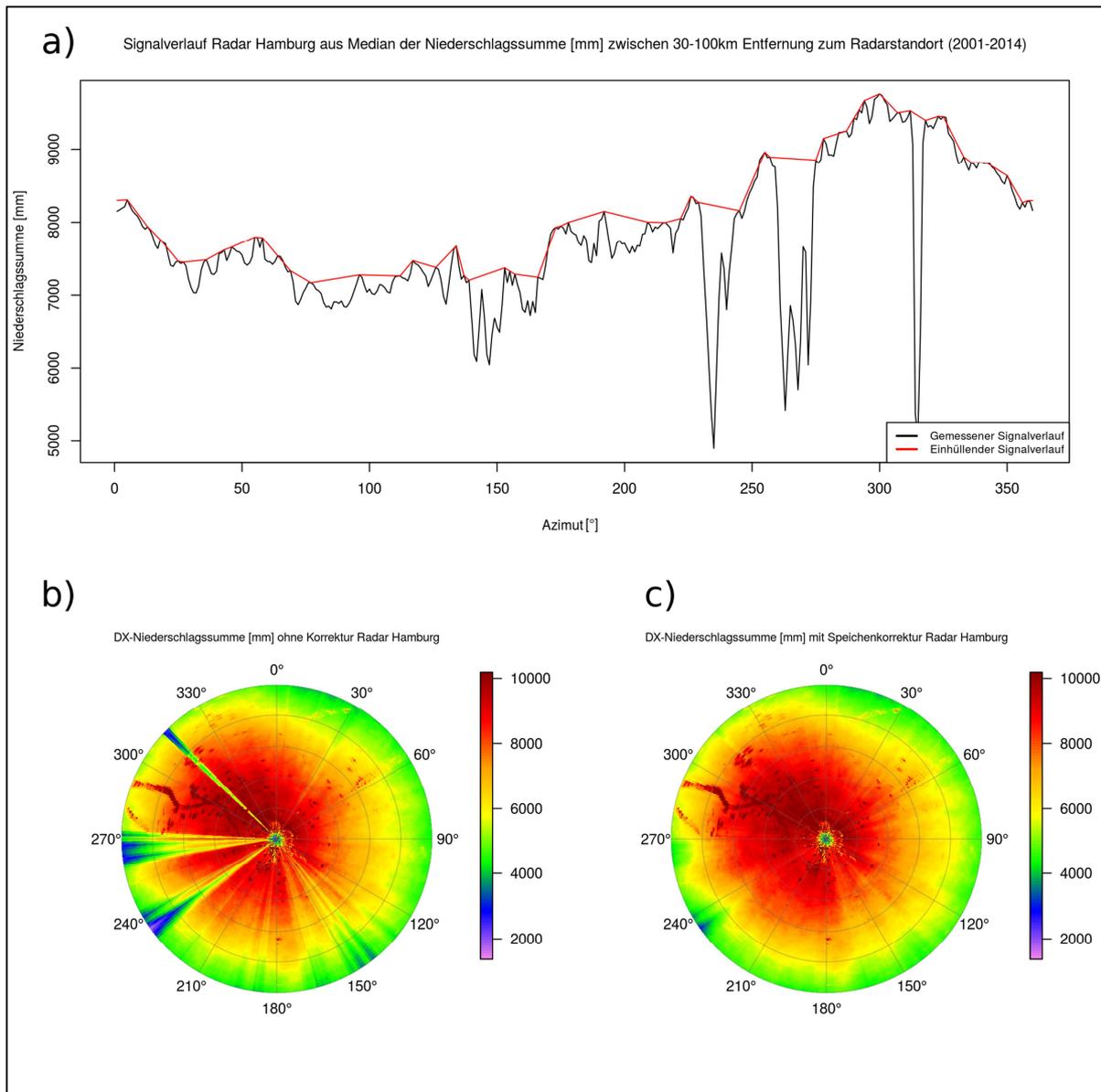


Abbildung 11: Automatisches Korrekturverfahren von Negativ-Speichen für den Radarstandort Hamburg (2001-2014), a) Signalverlauf entlang des Azimuts, b) Niederschlagssumme ohne Korrektur, c) Niederschlagssumme mit Korrektur der Negativ-Speichen.

durch Vervielfältigung des Signals durchgeführt. Ein lokales Minimum zeichnet sich dadurch aus, dass das Signal mit zunehmendem Azimutwinkel erst abnimmt und dann wieder zunimmt. Im nächsten Schritt werden alle lokalen Minima als Stützstelle der Einhüllenden entfernt, deren relativer Abfall der Signalstärke S zum Minimum hin und deren relativer Anstieg der Signalstärke S vom Minimum weg jeweils mehr als 3% beträgt.

$$\frac{S(d_i)}{S(d_{i-1})} < 0.97 \text{ und } \frac{S(d_{i+1})}{S(d_i)} > 1.03 \text{ mit } d_i = 1^\circ \dots 360^\circ$$

Im Anschluss wird der neue Signalverlauf erneut nach eben genannten Kriterium auf lokale Minima untersucht, welche ebenfalls wieder als Stützstelle für die Einhüllende entfernt werden. Der Vorgang wird solange wiederholt, bis kein lokales Minimum mehr gefunden wurde.

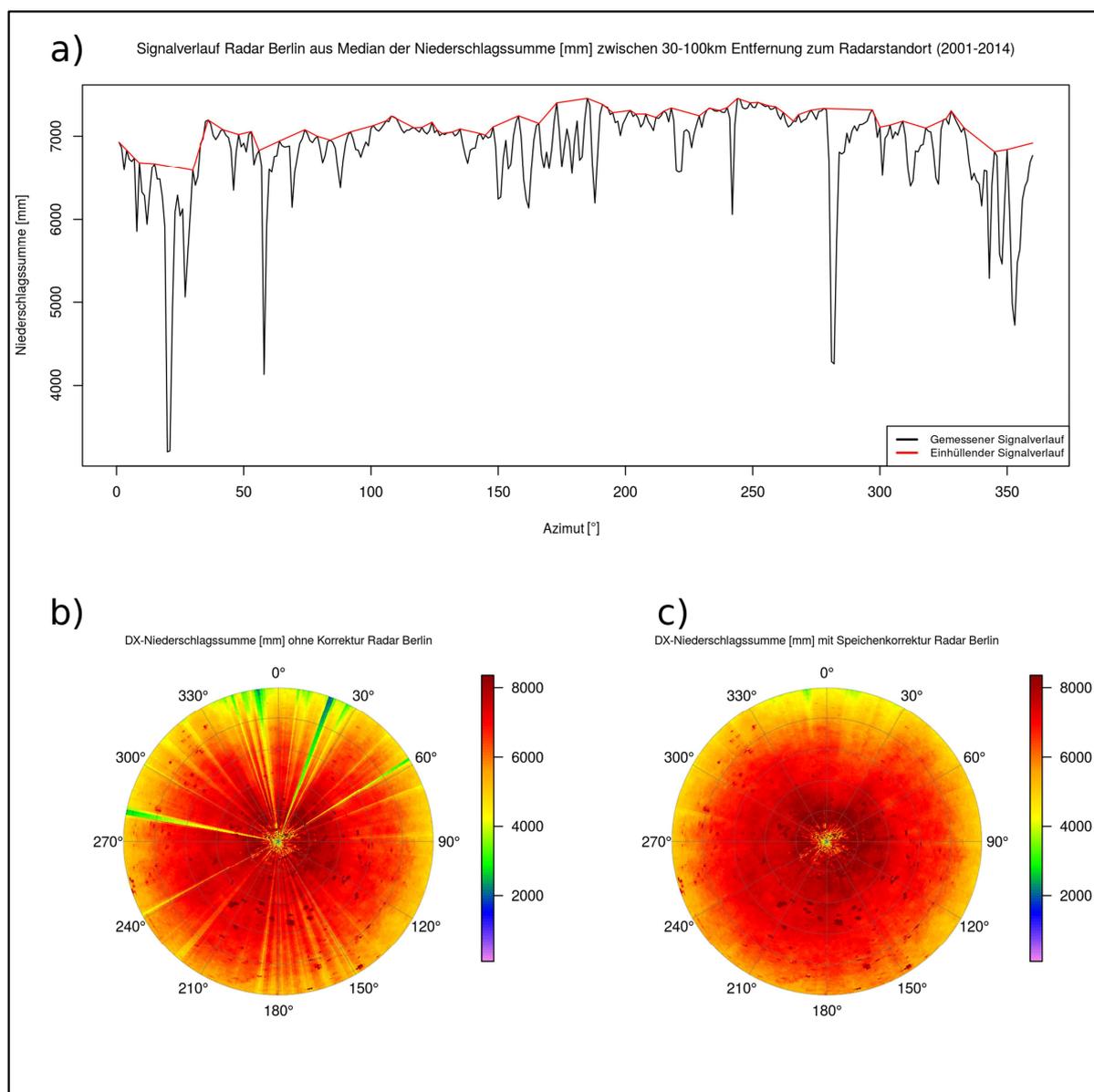


Abbildung 12: Automatisches Korrekturverfahren von Negativ-Speichen für den Radarstandort Berlin (2001-2014), a) Signalverlauf entlang des Azimuts, b) Niederschlagssumme ohne Korrektur, c) Niederschlagssumme mit Korrektur der Negativ-Speichen.

Über die Differenz zwischen dem gemessenen Signalverlauf und der Einhüllenden können nun anschließend Korrekturfaktoren bestimmt werden. Unter der Annahme, dass sich bei Betrachtung eines ausreichend langen Zeitraums ein relativ homogener Niederschlagsverlauf ergibt, wird im Folgenden der komplette Signalverlauf korrigiert.

Abbildung 11 und Abbildung 12 zeigen die beispielhaften Ergebnisse für die Radarstandorte Hamburg und Berlin. Diese Standorte weisen eine hohe Anzahl an latenten Negativ-Speichen auf und eignen sich insbesondere für die automatisierte Detektion dieser Speichen. Der Radarstandort Hamburg zeigt nicht nur einzelne markante Negativ-Speichen, wie zum Beispiel bei 320°, sondern auch größere Bereiche, bei denen es innerhalb einer Signalreduktion noch zu vereinzelt stärkerem Abfall des Radarsignals kommt (250-270°) (Abbildung 11 a+b).

Beide Fälle lassen sich durch die Einhüllende sehr gut korrigieren (Abbildung 11c). Auch für den Standort Berlin zeigt sich insgesamt eine sehr gute Korrektur der Negativ-Speichen (Abbildung 12c). Nur sehr markante Speichen sind nach Anwendung des Korrekturverfahrens noch vereinzelt schwach sichtbar. Darüber hinaus sind teilweise in der Entfernung vom Radarstandort noch Reste der Speichen erkennbar. Die Ursache hierfür liegt in der zeitweise vollständigen Auslöschung des Signals, das somit nicht korrigierbar ist.

Während zahlreiche Negativ-Speichen über den gesamten untersuchten Zeitraum latent vorhanden sind, treten einige Speichen nur in bestimmten Zeitabschnitten auf. Dies lässt sich beispielsweise durch den Auf- und Abbau von Hindernissen nahe einem Radarstandort erklären, wie es zum Beispiel häufig durch Baukräne geschieht. Auch hat sich gezeigt, dass sich der Faktor je nach Ausprägung und Stärke des Niederschlagfeldes ändert. Aus diesen Gründen wurde der betrachtete Zeitraum für die Bestimmung der Speichenkorrektur sukzessive verkürzt, wobei jedoch der Zeitraum so gewählt werden muss, dass die Annahme einer gleichmäßigen Niederschlagsverteilung gewährleistet ist. In der aktuellen Reanalyseversion wird daher ein täglich gleitendes Zeitfenster von 14 Tagen vor und 14 Tagen nach dem zu behandelnden Zeitpunkt als Grundlage verwendet. Sollte in diesem Zeitraum nicht genug Niederschlag gefallen sein, um die Annahme einer gleichmäßigen Niederschlagsverteilung zu rechtfertigen, dann wird keine Korrektur vorgenommen (Faktor gleich 1,0).

Weiterführende Untersuchungen haben ergeben, dass der Effekt der entfernungs- und höhenabhängigen Signalreduktion, trotz geeigneter Korrektur, einen Einfluss auf die Ergebnisse besitzt. Dadurch kommt es dazu, dass sich die Eigenschaften von Negativ-Speichen (Stärke der Dämpfung, Breite des betroffenen Sektors) mit zunehmender Entfernung ändern können. So entstehen statt geradliniger Sektoren teilweise „trompetenförmige“ Bereiche. Um diesem Effekt entgegen zu wirken, wird in der aktuellen Reanalyseversion 2017.002 statt eines einheitlichen Faktors pro Sektor eine entfernungsabhängige Korrekturfunktion ermittelt. Dabei wird der Korrekturfaktor nach oben beschriebenen Prinzip über ein für jeden Entfernungsschritt gleitendes Fenster einer Größe von 50 km ermittelt und mittels eines Polynoms 12. Grades über den Rangebereich ausgeglichen. Der ermittelte Faktor wurde darüber hinaus im Rahmen der Reanalyseversion 2017.002 auf einen Maximalwert von 10 begrenzt, um etwaige starke Überhöhungen des Niederschlags zu vermeiden. Die Notwendigkeit dieser Beschränkung ist Gegenstand weiterer Untersuchungen.

Aufgrund der Implementierung der automatisierten Korrektur von latenten Negativ- und Positiv-Speichen konnte eine deutliche Verbesserung der Datenqualität für die Radarklimatologie erzielt werden.

Ablauf der Korrektur der lokalen DX-Daten

Die Korrektur der lokalen Radardaten erfolgt in mehreren aufeinanderfolgenden Schritten:

Schritt 1:

- Anwendung der Artefakt-Korrektur
- Bestimmung der Faktoren zur entfernungsbedingten Signalverstärkung

Schritt 2:

- Anwendung der Faktoren zur entfernungsbedingten Signalverstärkung
- Anwendung der Artefakt-Korrektur
- Bestimmung der Speichenkorrekturfunktion

Schritt 3:

- Anwendung der Faktoren zur entfernungsbedingten Signalverstärkung
- Anwendung der Speichenkorrekturfunktion
- Anwendung der Artefakt-Korrektur

Die auf diese Weise korrigierten DX-Daten werden anschließend in die Reanalysedatenbank eingebracht und stehen für die Reanalyse zur Verfügung.

b. Von lokalen Reflektivitäten zum Deutschlandkomposit des Niederschlags

Um die lokalen Daten der 17 Standorte zu einem Deutschlandkomposit mit einheitlichen kartesischen Rastern zusammenzuführen, existieren verschiedene Verfahren. Zum einen müssen die lokalen Reflektivitätsdaten der Einzelstandorte, die in Polarkoordinaten vorliegen, auf das kartesische Raster des Komposits transferiert werden. Zum anderen sind im Überlappbereich der 17 Standortprodukte Annahmen zur Kombination der Daten zu treffen.

Die Auflösung der lokalen Daten beträgt 1° azimuthal und 1 km radial. Während im Nahbereich der Standorte mehrere Messungen in ein Rasterpixel des Deutschlandkomposits fallen, ist die Größe des Kreissegments in maximaler Entfernung vom Radarstandort von vergleichbarer Größe zum Rasterpixel. Die im Rahmen von RADOLAN genutzten sogenannten „Push“- und „Pull“-Verfahren unterscheiden sich in der Zuordnung der lokalen Werte zum Raster. Verifikationsergebnisse zeigen, dass das „Pull“-Verfahren im Mittel bessere Ergebnisse liefert, während das „Push“-Verfahren dazu neigt, Niederschlagsereignisse zu vergrößern. Das „Push“-Verfahren wird für das 5-Minuten-Produkt RZ und das „Pull“-Verfahren bei der Erstellung des RY-Produkts angewendet. Während in der operationellen Routine der Hauptproduktstrang im Jahre 2010 vom sogenannten „Push“-Verfahren auf das „Pull“-Verfahren umgestellt wurde, wird im Rahmen der Reanalyse für den Hauptproduktstrang als Grundlage für das angeeichte RW-Produkt einheitlich das „Pull“-Verfahren über den gesamten Zeitraum verwendet. Hierdurch ergeben sich für die Jahre 2005 bis 2010 deutliche Unterschiede in den Niederschlagssummen der RADOLAN-Reanalyse und RADOLAN-Online.

Verwendung des Qualitätsprodukts DXQ

Bei den beschriebenen Verfahren fließt darüber hinaus das Qualitätsprodukt DXQ aus der Routineproduktion ein. Wurde in den Daten ein Fehler erkannt und markiert, so geht dieser nicht in die Erstellung des Komposits ein.

Stetisierung

In den Regionen, in denen Daten von zwei oder mehreren Radarstandorten vorliegen, wird dem zugehörigen Rasterpixel ein gewichtetes Mittel der einzelnen lokalen Datenwerte zugewiesen. Dabei hängt das Gewicht von der Entfernung vom Radarstandort und der Qualität des Pixelwertes aus dem DXQ ab. Das Stetisierungsverfahren ist seit 2016 Teil der operationellen Echtzeitroutine und bewirkt eine Glättung der Übergänge zwischen den Radarstandorten und damit ein realistischeres Bild der Niederschlagsverteilung.

Von der Reflektivität zur Niederschlagsintensität

Radargeräte messen die Reflektivitäten der Hydrometeore im Messvolumen. Um die Reflektivitäten (Z) in Niederschlagsintensitäten (R) umzurechnen, sind Annahmen zur Tröpfchengrößenverteilung und -anzahl notwendig. Da diese auf der Basis der einfach polarisierten Messsysteme nicht direkt vorliegen, greift man auf standardisierte Literaturwerte zurück. Im Rahmen von RADOLAN wird eine erweiterte Z-R-Beziehung verwendet, die unter Berücksichtigung der absoluten dBZ-Werte sowie des horizontalen Gradienten eine Unterscheidung zwischen typisch konvektiven und stratiformen Tröpfchenverteilungen vornimmt [DWD, 2004]. Die Z-R-Beziehung wird für alle Pixel des Deutschlandkomposits zur Umrechnung der Reflektivitäten in Niederschlagswerte angewendet. Diese Werte stellen aber nur eine Abschätzung der wahren Niederschlagsmenge dar. Für eine realistische Bestimmung der Quantität ist eine Kombination mit Bodenmessdaten notwendig.

Ausblick: POLARA

Das POLARA-Softwarepaket, das im Zuge der Umrüstung des DWD-Radarmessnetzes auf Dual-Pol-Technik entwickelt wurde und die neue Standardsoftware für den operationellen Einsatz in der Echtzeitproduktgenerierung darstellen wird, umfasst umfangreiche neue Korrekturmethode, die auch unter Verwendung der Single-Pol-Momente eine Verbesserung der Datenqualität versprechen. Im Rahmen des Projekts wurden erste Untersuchungen zur Verwendbarkeit der POLARA-Software im Rahmen der Reprozessierung durchgeführt. Erste Vergleiche zwischen Ergebnissen reiner RADOLAN-Berechnungen (RADOLAN-Reanalyse V1.0) und der Kombination von POLARA und RADOLAN zeigten eine Verbesserung der Qualität der Daten. Die technische Entwicklung einer POLARA-Version zur Reanalyse von Radardaten ist derzeit noch in der Entwicklung. Perspektivisch wird eine Kopplung der beiden Softwarekomponenten angestrebt.

c. Das RADOLAN-Verfahren zur Aneichung

Das RADOLAN-Verfahren (RADar-OnLine-Aneichung) ist ein Verfahren zur Quantifizierung der radarbasierten Niederschlagsabschätzung unter Verwendung bodengebundener absoluter Niederschlagsmessungen. Das Verfahren wurde im Rahmen eines von der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) finanzierten Projekts entwickelt und wird seit Juni 2005 operationell im Deutschen Wetterdienst angewendet.

Die Aneichung erfolgt auf Basis der Niederschlagsstundensummen. Als Ausgangsprodukt dient die Summe der zwölf, mit Hilfe der Z-R-Beziehung umgerechneten, fünfminütigen Niederschlagsraten. Aufgrund der Datenverfügbarkeit erfolgt die Produkterstellung jeweils für die Stunde von (hh-1):50 bis hh:50.

Detaillierte Informationen zum Verfahren sind dem Abschlussbericht [DWD, 2004] zu entnehmen. Im Folgenden werden die wichtigsten Verfahrensschritte kurz zusammengefasst.

Differenzen-/Faktorenverfahren

Das Verfahren basiert auf der Annahme, dass der Vergleich zwischen den stations- und radarbasierten Niederschlagswerten am Ort der Niederschlagsstation repräsentativ für eine definierte Umgebung ist. Über die Bestimmung der Faktoren und Differenzen an allen Bodenstationen und die Interpolation der Punktwerte auf das Raster wird eine flächendeckende Aneichung der radarbasierten Niederschlagsschätzungen ermöglicht.

In einem ersten Schritt werden für alle Bodenniederschlagsstationen sowohl die Differenzen als auch die Faktoren zwischen den Niederschlagswerten an den Bodenstationen und an den zugehörigen Rasterpixeln des Radarkomposits gebildet:

$$F_i = \frac{RR_{i,Boden}}{RR_{i,Radar}}$$

$$D_i = RR_{i,Boden} - RR_{i,Radar}$$

Dabei werden neben dem geografisch direkt zugeordneten Rasterpixel auch die Werte der umgebenen Pixel betrachtet. Zur Bestimmung des resultierenden Faktors bzw. der Differenz geht das Pixel des Neunerfeldes mit der geringsten absoluten Differenz zum Bodenwert ein. Fachlicher Hintergrund der Betrachtung des Neunerfeldes ist die Tatsache, dass die vom Radar in der Höhe gemessenen Hydrometeore durch ein Verdriften in der Atmosphäre nicht notwendigerweise im selben Pixelgebiet den Boden erreichen.

Die an den Rasterpixeln aller Bodenstationen ermittelten Faktoren und Differenzen werden im zweiten Schritt auf das gesamte RADOLAN-Rasterfeld interpoliert. Für jedes Rasterpixel

werden alle innerhalb eines definierten Radius liegenden Faktoren und Differenzen entfernungsabhängig gewichtet addiert und normiert. Die gewählte Gewichtungsfunktion fällt dabei mit der Entfernung vom Stationspixel schnell ab. Das Verfahren führt folglich dazu, dass auch der Wert des Pixels am Ort einer Station von den Werten der umliegenden Stationen beeinflusst wird. Der Radius muss dabei so groß gewählt werden, dass zu jedem Rasterpixel zugehörige Stationswerte gefunden werden, auf der anderen Seite aber so klein gewählt werden, dass keine zu starke Glättung der Werte erfolgt. Der Radius wurde im Rahmen der Radarklimatologie auf der Basis von Testrechnungen auf 40 km festgelegt.

Die interpolierten Faktoren und Differenzen werden anschließend pixelweise auf die Niederschlagsstundensumme angewendet. Als Ergebnis erhält man zwei angeeichte Niederschlagsprodukte RA (Differenzen) und RM (Faktoren).

$$RR_{i,RM} = F_i \times RR_{i,Radar}$$

$$RR_{i,RA} = D_i + RR_{i,Radar}$$

„Best-of-two“

Um ein optimales Niederschlagsprodukt zu erstellen, werden die Ergebnisse der zwei verschiedenen Aneichverfahren gewichtet addiert. Zur Bestimmung der Gewichte werden die Aneichungen auf der Basis der Faktoren und Differenzen ein weiteres Mal durchgeführt, wobei in der RADOLAN-Klimaversion 33 % (20 % in der RADOLAN-Echtzeitroutine) der Stationswerte als Kontrollstationen definiert und nicht in der Aneichung berücksichtigt werden. Anschließend wird für jede Position der Kontrollstationen ermittelt, welches Aneichverfahren das bessere Ergebnis (mit der geringeren absoluten Differenz) liefert.

Die auf diese Weise an den Kontrollstationen ermittelten Gewichtstupel [0,1] bzw. [1,0] werden anschließend entsprechend der Faktoren und Differenzen auf das komplette Raster interpoliert. Mit Hilfe der interpolierten Gewichtstupel erfolgt die gewichtete Addition der Ergebnisse der Faktoren- und Differenzenaneichung (unter Verwendung aller Stationen).

Auswahl der Kontrollstationen

Die Auswahl der Kontrollstationen erfolgt über die Bestimmung einer Startposition (Rasterposition einer Kontrollstation) und die anschließende sukzessive Bestimmung des jeweils drittnächsten (fünftnächsten in der RADOLAN-Echtzeitroutine) Stationspixels, bis die gewünschte Anzahl an Kontrollstationen erreicht wurde. In der Echtzeitvariante wird die Ausgangsposition über einen Zufallsgenerator bestimmt. Da hierdurch die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse nicht gewährleistet ist und somit Vergleichsrechnungen nicht direkt möglich sind, wurde in der Klimaversion die explizite Bestimmung einer Startposition eingerichtet. Die Verwendung unterschiedlicher Kontrollstationen besitzt Einfluss auf das Endergebnis der Aneichung und wurde im Rahmen von Unsicherheitsabschätzungen untersucht.

d. Disaggregation

Um eine Aneichung der stündlichen radarbasierten Niederschlagsschätzungen vornehmen zu können, werden entsprechende Daten der Bodenstationen in mindestens stündlicher Auflösung benötigt. Der Deutsche Wetterdienst betreibt hierzu ein Messnetz automatisierter Stationen, die den Niederschlag mit einer Auflösung von einer Minute messen und die Daten stündlich an die Zentrale in Offenbach übermitteln. Darüber hinaus existiert ein Messnetz mit Tageswertstationen. Im Rahmen der klimatologischen Reprozessierung der Daten konnten auch die täglichen Niederschlagswerte verwendet werden. Dies ist insbesondere in den ersten Jahren des Reanalysezeitraums wichtig, da die Anzahl der modernen automatischen

Stationen noch sehr gering war und somit die Repräsentativität dieser Aneichstationen für einen sehr großen Radius angenommen werden müsste.

Um die Tageswerte in die Aneichung zu integrieren, wurde ein Disaggregationsverfahren auf der Basis von Paulat et al. (2008) entwickelt. Die Tageswerte der Bodenstationen werden hierzu mit den Tagessummen der radarbasierten Niederschlagsschätzungen ins Verhältnis gesetzt. Der ermittelte Faktor wird im Folgenden auf die Stundenwerte der Radardaten angewendet, um einen synthetischen Stundenwert für die Aneichstation zu ermitteln.

Mit diesem Verfahren konnte die Stationsanzahl der verfügbaren DWD-Stationen im Jahr 2001 von ca. 150 auf ca. 4000 Stationen erhöht werden, was zu einer deutlichen Verbesserung der Aneichung führt.

e. Fazit

Im Rahmen der Erstellung einer Softwareumgebung für die klimatologische Reanalyse der radarbasierten Niederschlagsmessungen wurden signifikante Qualitätsverbesserungen erreicht. Die wichtigsten Innovationen sind im Folgenden zusammengefasst:

- Artefaktkorrektur
 - Eliminierung radartypischer Fehler, die in der langzeitlichen Summation in Erscheinung treten
- Korrektur der entfernungs- und höhenabhängigen Signalreduktion
 - Entwicklung eines innovativen Verfahrens zur klimatologischen Korrektur der Abnahme des registrierten Niederschlags mit der Messhöhe. Dabei wird die Abhängigkeit des Fehlers von der Jahreszeit sowie der Intensität des Niederschlags gleichzeitig berücksichtigt.
 - Die Korrektur liefert realistische Niederschlagsverteilungen und ermöglicht somit die Verbesserung der Niederschlagsanalyse für Deutschland.
- Speichenkorrektur
 - Adaption und Weiterentwicklung eines Verfahrens zur Detektion und Korrektur von Speichen
 - Entwicklung eines innovativen Verfahrens zur automatischen Anwendung auf die komplette Zeitreihe der Radarklimatologie
 - Die Korrektur liefert realistische Niederschlagswerte in den gestörten Radarsegmenten und ermöglicht somit die Verbesserung der Niederschlagsanalyse für Deutschland.
- Disaggregation der Tageswerte
 - Adaption und Anwendung des Disaggregationskonzepts zur Verwendung der Tageswertdaten
 - Umfangreiches Datenhandling zur optimalen Nutzung aller verfügbaren Niederschlagsdatenquellen
 - Das Verfahren führt zu einer deutlichen Verbesserung der Aneichung, insbesondere in den ersten Jahren der Reanalyse mit nur geringer Anzahl an automatischen Niederschlagsstationen.

5 Technische Umsetzung

Das Projekt beinhaltet die Reprozessierung und qualitative Optimierung der historischen, radarbasierten Niederschlagsanalysen beginnend ab dem 01.01.2001. Dabei wurden die Produkte des RADOLAN-Verfahrens mit dem aktuellen operationellen – sowie im Laufe des Projekts erweiterten – RADOLAN-Verfahren nachberechnet.

Diese Reanalyse erfordert insgesamt einen hohen Rechen- und damit auch Zeitaufwand. Der Aufwand ergibt sich aus der Anzahl der zu reprozessierenden lokalen Radardaten (aktuell 17 Standorte) zuzüglich der zugehörigen Qualitätsdaten in jeweils fünfminütiger Auflösung, den aufwändigen klimatologischen Korrekturverfahren sowie der Anzahl der Boden-niederschlagsdaten (Stunden- und Tageswerte) zur Aneichung.

a. Reanalyseversion

Die Reanalysen werden mit einer sogenannten Lauf-Kennung YYYY.KLL versehen, die sich aus dem Jahr YYYY, in dem der Lauf gestartet wurde, der Kategorie K und einer fortlaufenden Nummerierung LL zusammensetzt. Es wird zwischen den Kategorien K=0=Einfacher Reanalyselauf, K=1=Verifikationslauf und K=2=Ensemble-Reanalyselauf unterschieden. Die Laufnummer LL ist dabei unabhängig von der Kategorie K und startet in jedem neuen Jahr mit 00. Die finalen Läufe fallen somit unter die Kategorien 0 und 2.

Im Rahmen des Projekts wurden insgesamt 33 Reanalyseläufe gerechnet. Als komplette Reanalyseversionen stehen die Läufe 2014.002, 2016.003, und 2017.002 zur Verfügung, die folgende Hauptmerkmale besitzen.

1. Reanalyse (Lauf 2014.002)

Der Grunddatensatz der ersten Reanalyse umfasst die Jahre 2001 bis 2014. Mit der Verlängerung der Zeitreihe zurück in das Jahr 2001 stehen erstmals quantitative Radarniederschlagsauswertungen für den Zeitraum 2001 bis 2005 deutschlandweit zur Verfügung. In die Reanalyse flossen Erfahrungen und Erkenntnisse aus gut zehn Jahren RADOLAN-Online-Betrieb ein:

- Verwendung einer konstanten Methode zur Steigerung der Homogenität im Vergleich zu RADOLAN-Online
- Verlängerung der Zeitreihe zurück bis in das Jahr 2001
- Verwendung der Pull-Methode zur Kompositierung der lokalen Radardaten
- Anwendung einer Stetisierung im Überlappbereich der lokalen Radardaten

Mittlerweile wurden die Jahre 2015 und 2016 im Rahmen des Projektes „Radarklimatologie“ nachgeführt. Eine Nachführung darüber hinaus ist jedoch nicht geplant.

2. Reanalyse (Lauf 2016.003)

Der Grunddatensatz der zweiten Reanalyse umfasst die Jahre 2001 bis 2015. Die Analyse der ersten Reanalyse (Lauf 2014.002) zeigte, dass die Zahl der Aneichstationen im Zeitraum 2001 bis 2005 zu gering war. Aus diesem Grund wurden technische und fachliche Methoden entwickelt, um Daten von digitalisierten konventionellen Stationen (Offline-Stationen) in stündlicher Auflösung sowie von Stationen mit Daten in täglicher Auflösung einzubinden. Damit einher ging eine Optimierung des Aneichverfahrens bezüglich der neuen Datengrundlage (Gewichtungsfunktion für räumliche Interpolation, Interpolationsradius, Kontrollstationsdichte). Darüber hinaus wurde ein Filter implementiert, der Stationswerte, die zu deutlich zu hohen bzw. zu niedrigen Aneichfaktoren/-differenzen führen, für das jeweilige Teilverfahren blockiert.

- Verbesserungen aus der ersten Reanalyse (Lauf 2014.002)
- Einbindung von digitalisierten konventionellen Messungen in stündlicher Auflösung
- Einbindung von Messungen in täglicher Auflösung
- Verfahren zur Disaggregation der täglichen Daten zu synthetischen Stundendaten (DIAGG-Verfahren)
- Optimierung des Aneichverfahrens auf die neue Datengrundlage
 - Anpassung der Gewichtungsfunktion zur räumlichen Interpolation
 - Verkleinerung des Interpolationsradius von 60 km auf 40 km
 - Erhöhung der Kontrollstationsdichte von 20 % auf 33 %
- Filterung von unrealistischen Aneichfaktoren/-differenzen (BodCorr-Verfahren)
 - Faktoren: $0,1 < F < 15,0$
 - Differenzen: $-10,0 < D < +10,0$
- Radar-Fehlwerte werden nicht mehr mit interpolierten Bodendaten ersetzt

Mittlerweile wurde das Jahr 2016 im Rahmen des Projektes „Radarklimatologie“ nachgeführt.

3. Reanalyse (Lauf 2017.002)

Der Grunddatensatz der dritten Reanalyse umfasst die Jahre 2001 bis 2016. Der Entwicklungsschwerpunkt lag diesmal auf der Vorprozessierung der lokalen Radardaten. Die Analysen der vorangegangenen Versionen zeigten, dass vor allem noch die entfernungsabhängige Signalabschwächung und die Abschattungseffekte durch Blockade des Radarstrahls an Orografie und Gebäuden zu lokalen Unterschätzungen führten. Dies wurde in beiden Fällen mit klimatologischen bzw. zeitabhängigen Korrekturfaktoren behoben.

- Verbesserungen aus den vorangegangenen Reanalysen (Läufe 2014.002 und 2016.003)
- Klimatologischer Faktor zur Korrektur der entfernungsabhängigen Signalabschwächung
- Zeitabhängige Faktoren zur Korrektur von Abschattungseffekten (Speichen; damit verbunden ist die Abschaltung der Korrektur von orografischer Abschattung in RADOLAN)
- Einschränkung des maximalen Radius auf 128 km im gesamten Zeitraum

Eine Weiterführung ist für die nächsten Jahre geplant.

b. Batchsystem

Im DWD stehen zwei Servertypen zur Verfügung: zentrale („Ebene-1-Server“, Großrechner) und dezentrale Systeme („Ebene-2-Server“). Die operationellen, zeitkritischen Anwendungen wie z. B. RADOLAN werden auf den zentralen Systemen gerechnet. Aufgrund der hohen Anforderungen der RADOLAN-Reanalyse an Rechenzeit und Speicherkapazität ist die Nutzung der zentralen Systeme unter Berücksichtigung der verfügbaren Ressourcen und ohne Beeinträchtigung anderer Anwender nicht möglich. Daher wurde eine Migration des RADOLAN-Systems auf die dezentralen Systeme (virtuelle Server), die seit einigen Jahren im DWD für Anwendungen mit speziellen Anforderungen aus den Fachabteilungen verstärkt zum Einsatz kommen, durchgeführt. In enger Zusammenarbeit mit den IT-Verantwortlichen des DWD konnte aus diesen dezentralen Systemen ein RADOLAN-Rechencluster aufgebaut werden, wodurch sich die Reprozessierung parallelisieren lässt. Dies führt zu einer erheblichen Reduzierung der Rechenzeit und ermöglicht die Durchführung der umfangreichen Re- und Postprozessierung innerhalb eines Zeitrahmens von mehreren Wochen bis zu wenigen Monaten. Die Anzahl der eingebundenen virtuellen Server ist dabei an die jeweilige Verfügbarkeit im Rahmen der strategischen Bewirtschaftung der IT-Systeme des DWD gebunden.

Architektur des RADOLAN-Reanalyse-Clusters

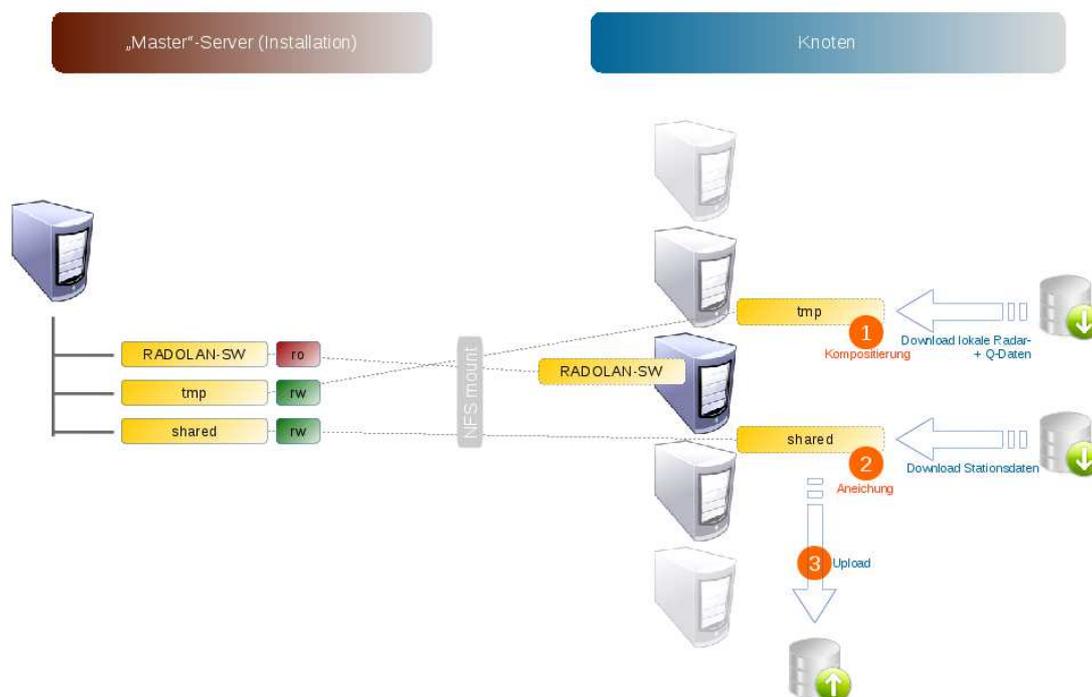


Abbildung 13: Architektur des RADOLAN-Reanalyse-Clusters.

Während der Projektlaufzeit standen für die Durchführung der Re- und Postprozessierung bis zu 61 Rechenknoten zur Verfügung.

Die optimale Verteilung der Jobs innerhalb des Clusters sowie die Überwachung der einzelnen Prozesse erfolgen über ein Batch-System inklusive Benutzeroberfläche, die über einen Browser bedient werden kann. Abbildung 13 zeigt einen Screenshot des Systems.

Architektur und Arbeitsweise

Das RADOLAN-Cluster besteht derzeit aus 61 Servern („Knoten“), die die Berechnungen durchführen und einem Server („Master“), der die Kontrolle und Verteilung der Aufgaben („Jobs“) übernimmt. Die Hardwareausstattung der Server beträgt gleichermaßen sieben CPU-Kerne und 30 GB RAM. Alle Server verfügen über die gleiche Softwarekonfiguration¹. Auf dem Master-Server sind zusätzlich die angepasste RADOLAN-Reanalyse-Software und ein Webserver installiert. Das RADOLAN-Cluster ist als ein dynamischer Verbund konzipiert, aus dem bei Bedarf Rechner entfernt oder hinzugefügt werden können.

Die Parallelisierung wird dadurch erreicht, dass jeder Knoten Jobs übernimmt und eigenständig abarbeitet. Die gesamte Reanalyse wird hierzu in einzelne, voneinander unabhängige Zeitabschnitte, i. d. R. Monatsschritte, aufgeteilt. Jeder Knoten arbeitet auf seinem Weg zur Erstellung eines Komposits in einem eigenen temporären Verzeichnis. Der Zugriff von den Knoten auf die Reanalyse-Software erfolgt über ein Netzlaufwerk (Shared-NFS²-Mount). Somit muss die Installation nur auf dem Master durchgeführt und gepflegt werden. Auch der Datenaustausch der fertigen Reanalyse-Produkte erfolgt über das Netzlaufwerk. Nach der fachlichen Prüfung der Ergebnisdaten werden diese zur Archivierung in eine Datenbank überspielt.

1 Betriebssystem: openSUSE 13.2 inkl. für RADOLAN notwendige Softwarepakete

2 Network File System

Die Überwachung und Steuerung des RADOLAN-Clusters erfordern eine visuelle Kontrolle und Steuerung. Es wurde daher ein Job-Scheduling- oder Batch-System in Form einer Webanwendung aufgebaut. Dieses Websystem hat zwei Funktionen:

1. Überwachung des Zustands von Knoten und Jobs
2. Verteilen von Jobs (Scheduling)

Zur Überwachung werden von den Knoten, je nach Status, die Meldungen *queued*, *running* oder *error* abgegeben. Diese sind im Websystem für den Bearbeiter/die Bearbeiterin erkennbar. Die Kommunikation zwischen Knoten und Master erfolgt dabei über das Internet-Protokoll HTTP³. Die Meldung des Status eines Jobs an das Scheduling-System erfolgt durch Exit-Codes.

Das System übernimmt das automatische Verteilen („Queue“) und Starten von wartenden Jobs. Ein neuer Job kann erst nach einer vordefinierten Zeit (z. B. fünf Minuten) gestartet werden, um konkurrierende Datenbank-Zugriffe zu vermeiden. Zudem können fehlerhafte oder abgebrochene Jobs neu gestartet werden.

c. Postprocessing

Das Postprocessing ist technisch in zwei Säulen aufgeteilt. Auswertungen, die auf Basis der Komposits erfolgen, sind im Programmpaket RADKLIM zusammengefasst. Auswertungen der Zeitreihen werden auf Pixelbasis im Rahmen von RADPIX durchgeführt.

RADKLIM ist eine Sammlung von Python-Skripten zur Auswertung der RADOLAN-Klimadaten. Sie basieren auf Python 2.6 mit den Paketen *numpy*, *scipy* und *matplotlib*. Mit RADKLIM werden klassische Auswertungen wie Summationen und Mittelwertbestimmungen durchgeführt. Darüber hinaus werden aus den Kompositdaten Pixel-Zeitreihen generiert, die durch die RADPIX-Programme ausgewertet werden.

RADPIX ist eine Sammlung von Fortran-Programmen zur Auswertung von Pixel-Zeitreihen der RADOLAN-Klimadaten. Spezielle Auswertungen benötigen die Betrachtung kompletter Zeitreihen, z. B. die Bestimmung des ranghöchsten Niederschlags im gesamten Zeitraum. Derartige Betrachtungen sind daher nicht auf der Basis des kompletten Komposits mit überschaubaren Ressourcen durchführbar. Die Ergebnisse der Verfahren liegen ebenfalls pixelweise vor und werden im Anschluss wiederum zu Komposits zusammengefasst.

d. Produktformat

Die Ergebnisse der klimatologischen Auswertungen liegen im sogenannten RADOLAN-Komposit-Format vor. Die Dateien bestehen aus einem ASCII-Header gefolgt von einem binären Datenteil. Der ASCII-Header enthält die generellen Informationen zum vorliegenden Produkt, z. B. die Produktkennung, die Versionsnummer und den Zeitstempel. Der Datenteil umfasst 1100 x 900 Rasterwerte, die – mit Ausnahme der Reflektivitätsprodukte – aus vier Informationsbits und zwölf Datenbits in „little endian“-Codierung bestehen. Die Informationsbits enthalten produktspezifische Informationen zu dem jeweiligen Pixel. Der Datenblock beginnt mit dem Pixel in der linken unteren Ecke des Komposits.

Die Daten liegen in polarstereographischer Projektion vor. Die Rastergröße beträgt 1 km x 1 km in der Projektionsebene. Abbildung 14 zeigt die Lage des RADOLAN-Rasters. Die Angaben (WGS84) sind dabei auf die vierte Nachkommastelle gerundet.

3 Hypertext Transfer Protocol

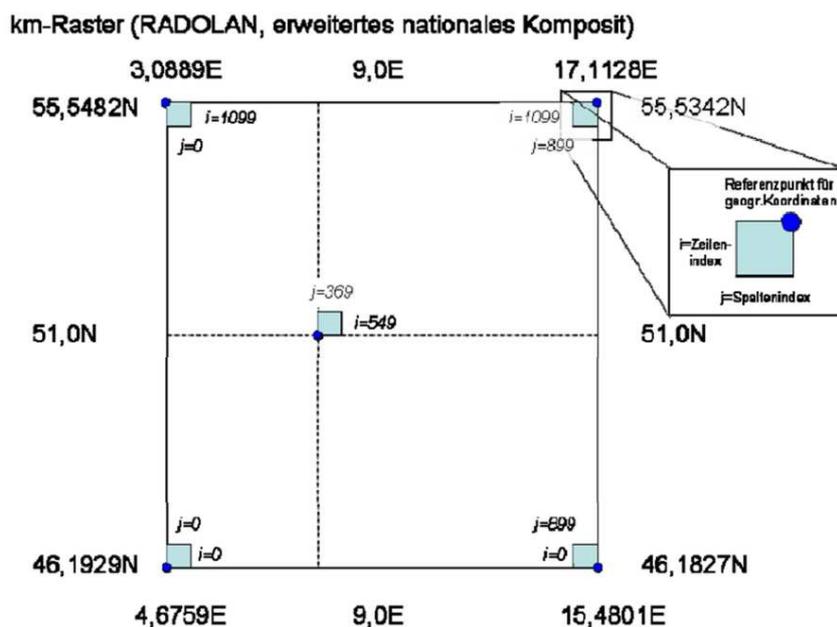


Abbildung 14: Raster des erweiterten nationalen Komposits der RADOLAN-Reanalyseprodukte (erweitertes RADOLAN-Raster).

Details zur Projektion, zur Belegung der Informationsflags und zum Inhalt des Headers sind der Kompositformatbeschreibung [DWD, 2016b] zu entnehmen.

e. RADKLIM-GIS-Toolbox

Um die korrekte visuelle Darstellung sowie die Kombination der Ergebnisse mit externen Informationen zu ermöglichen, wurde eine Toolbox (bzw. ein Plugin) für ArcGIS- und QGIS-Anwendungen entwickelt. Mit Hilfe der Toolbox werden Daten im RADOLAN-Format eingelesen und auf ein INSPIRE-konformes Gitter (LAEA-Projektion) transformiert. Die Daten stehen somit für die Weiterverarbeitung im GIS-System zur Verfügung. Wahlweise kann ein Standardplot mit automatischer Generierung von Legende und Titel im Corporate Design erstellt werden. Hierzu sind diverse Produkte – z. B. Niederschlagssummen, Überschreitungen, statistische Niederschläge, R-Faktoren – die über die Produkt-ID zugeordnet werden, vordefiniert. Das Plugin kann darüber hinaus in der speziellen GIS-Anwendung TopDeutschland [BKG, 2017] verwendet werden.

Detaillierte Informationen zur Funktionalität und Anwendung der RADKLIM-Toolbox sind den jeweiligen Handbüchern (*auf Englisch*) für die ArcGIS-Toolbox sowie das QGIS-Plugin zu entnehmen [DWD, 2017a, b].

f. Fazit

Die Durchführung einer klimatologischen Reprozessierung zeitlich und räumlich hoch aufgelöster Daten stellt eine große Herausforderung an die IT-Umgebung dar. Diese umfasst das Datenhandling inklusive der Datenbankanbindung, die Zeitoptimierung der Prozesse und die Ausfallsicherheit bzw. Rückfalloptionen. Die wichtigsten Aspekte sind im Folgenden zusammengefasst:

- Migration der Software vom Großrechner auf ein Cluster virtueller Server
- Einrichtung einer benutzerfreundlichen Batch-Steuerung

- Einbindung der Rechnerressourcen in die übergeordnete IT-Strategie des Deutschen Wetterdienstes zur Gewährleistung der Nachhaltigkeit
- Zeitoptimierung durch paralleles Rechnen und Optimierung der Software
- Einrichtung der Datensicherung unter Gewährleistung einer störungsfreien zeitkritischen Routine im Bereich von Wettervorhersage und Warnmanagement
- Ausfallsicherheit des Gesamtlaufs über ein hoch aufgelöstes zeitliches Splitting, das das Nachrechnen einzelner Segmente ermöglicht.
- Entwicklung einer GIS-Toolbox zur Koordinatentransformation und optimierten Visualisierung der Produkte inkl. Batch-Option

6 Ergebnisse und Produkte

Auf der Basis der stündlich angeeichten Niederschlagssummen wurde eine Vielzahl an Daten und Bildprodukten erstellt. Im Rahmen des Berichts können daher nur repräsentative Beispiele gezeigt und diskutiert werden. Die im Rahmen des Projekts entwickelte Toolbox ermöglicht jedoch sowohl die standardisierte Visualisierung als auch die Weiterverarbeitung der Produkte im GIS-System. Im Folgenden werden die verschiedenen Produktkategorien vorgestellt, die Methodik zur Erstellung der Daten erläutert und ausgewählte Ergebnisse präsentiert und diskutiert.

a. Was definiert ein Ereignis?

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.

Um Aussagen zu Starkniederschlagsereignissen treffen zu können, wurde im Rahmen des Projekts die Definition des DWA-Arbeitsblatts 531 [DWA, 2012] verwendet, die auch für die Bestimmung statistischer Niederschläge herangezogen wird. Demnach betrachtet man ortsfeste Niederschlagszeitreihen. Ereignisse sind unabhängig, wenn bei Dauerstufen bis vier Stunden mindestens vier niederschlagsfreie Stunden zwischen den Ereignissen liegen. Bei Dauerstufen von mehr als vier Stunden ist ein Mindestabstand von der Größe der Dauerstufe erforderlich, um das Kriterium der Unabhängigkeit zu erfüllen.

Die Auswertungen der Niederschlagsdaten erfolgten in der Regel sowohl auf der Basis aller, auch abhängiger Stundenwerte sowie für unabhängige Ereignisse entsprechend der vorgestellten Definition.

b. Klassische Statistik

Methodik

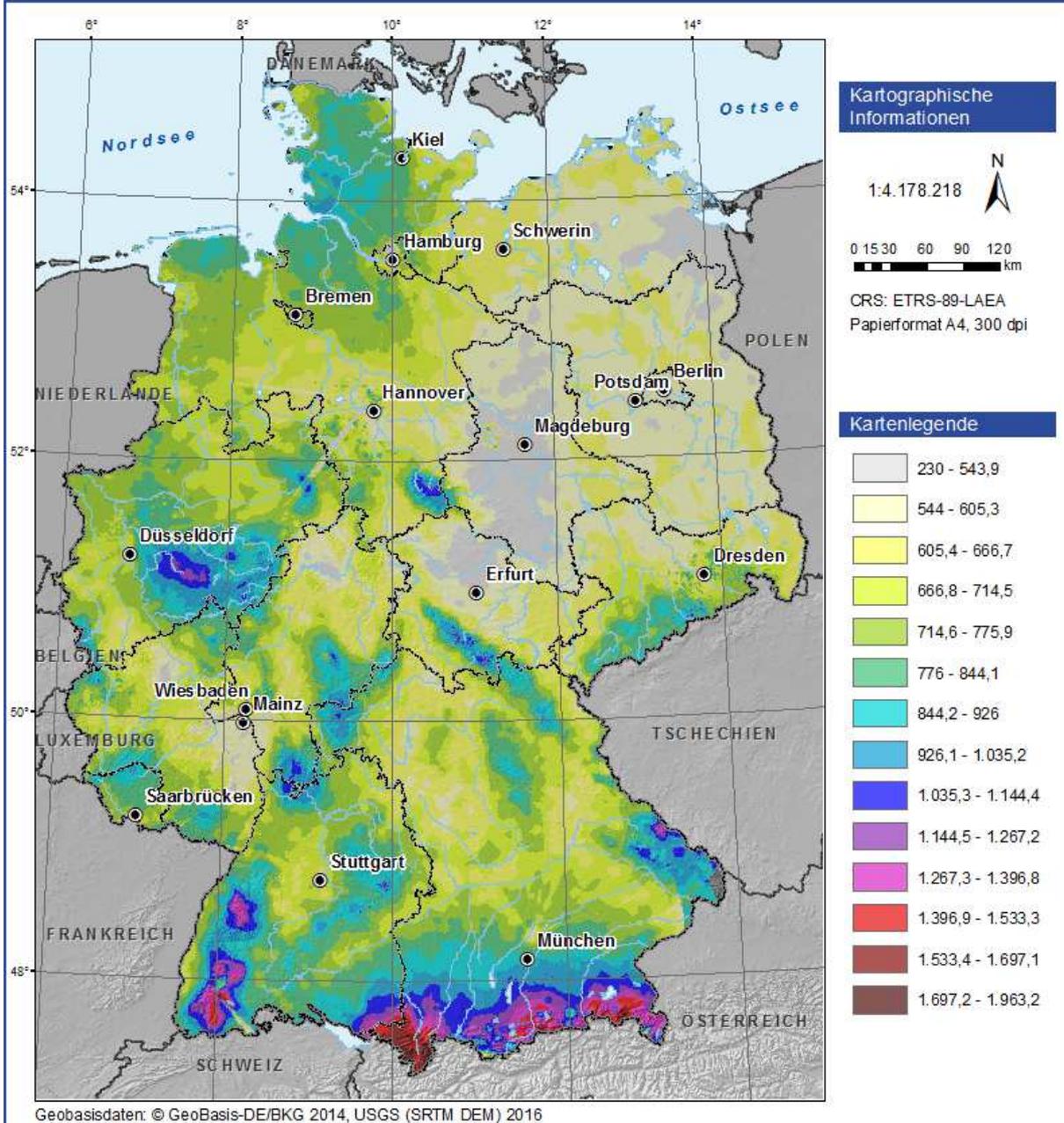
Die Ergebnisse der klassischen Statistik umfassen Niederschlagsprodukte mit unterschiedlichen Zeitbezügen. Dazu zählen Niederschlagssummen über Zeitintervalle von einer Stunde bis zum Gesamtzeitraum von 16 Jahren. Da die Reichweite der Messgeräte des Radarverbundes keine vollständige Abdeckung des Bundesgebiets erlaubt, wurde ein zusätzliches Produkt entwickelt, das die Ergebnisse der Radarklimatologie in den entsprechenden Gebieten mit den Niederschlagsdaten der interpolierten Bodenstationsmessungen aus dem REGNIE-Produkt [Rauthe, 2013] ergänzt.

In den 16 Jahren der radarbasierten Niederschlagsmessung sind nicht alle Orte gleichermaßen vermessen worden. Ursachen hierfür sind z. B. Radarausfälle oder Standortverlegungen. Zur Bestimmung der mittleren Niederschläge $RR_{skaliert}$ werden die Daten daher entsprechend der Datenverfügbarkeit skaliert:

$$RR_{skaliert} = RR \cdot \frac{N}{N - n_{miss}}$$

Hierbei sind RR der gemessene Niederschlagswert, N die erwartete Anzahl der Messwerte pro Zeiteinheit und n_{miss} die Anzahl der Fehlwerte im betrachteten Zeitraum.

Skalierter mittlerer Jahresniederschlag im Gesamtzeitraum (mm) von 01.01.2001 05:50 UTC bis 01.01.2017 05:50 UTC



Projekt Information

Eine Ergebniskarte des Verbundprojekts Radarklimatologie der Strategischen Behördenallianz Anpassung an den Klimawandel



Klimadaten und Bearbeitung: © DWD 2017

Abbildung 15: Skalierter mittlerer Jahresniederschlag für Deutschland, Standard-Kartendarstellung.

Ergebnisse und Diskussion

Abbildung 15 zeigt den skalierten mittleren Jahresniederschlag auf der Basis der sechzehnjährigen Radarklimatologie. Besonders hohe Jahresniederschlagswerte findet man in den Mittel- und Hochgebirgsregionen. Insbesondere der Alpenraum und der Hochschwarzwald treten hier mit Werten, die großflächig deutlich über 1.000 mm/a liegen, in Erscheinung. Darüber hinaus sind der Bayerische Wald, die Schwäbische Alb, das Erzgebirge, der Harz, der Thüringer Wald und der Spessart zu erkennen. Hohe Werte treten im 16-jährigen Mittel auch im südöstlichen Nordrhein-Westfalen auf. Extrem niedrige Werte sind im gesamten ostdeutschen Gebiet mit Ausnahme der Erzgebirgsregion zu finden. Insbesondere Sachsen-Anhalt weist extrem geringe Niederschlagswerte auf.

Die langjährige Summe zeigt, dass aufgrund der umfangreichen Fehlerkorrekturverfahren, die im Rahmen des Projekts entwickelt wurden, nur noch vereinzelte messtechnisch bedingte Fehler in den Daten zu erkennen sind. So sind die Ausblendsektoren am Standort Feldberg erkennbar sowie einzelne sehr stark ausgeprägte Negativspeichen an den Standorten Hamburg, Hannover und Rostock sowie Berlin und München. Hier greift zum einen die Beschränkung des Korrekturfaktors im Bereich der Speichen auf den Wert 10, zum anderen ist eine multiplikative Korrektur der Speichen nicht möglich, wenn der Wert im Bereich der Speiche auf null reduziert ist. Eine Auffüllung der Bereiche durch interpolierte Bodendaten wurde im Rahmen der Reanalyse nicht durchgeführt, um die Ergebnisse der Extremwertstatistik nicht zu beeinflussen. Mögliche Korrekturverfahren für die verbliebenen Speichen können in den folgenden Reanalyseläufen erprobt werden. Neben statischen Korrekturen könnte eine Auffüllung der Ausblendsektoren durch einen Nowcastingansatz erfolgen, bei dem die im Rahmen der Analyse nicht erfassten Bereiche durch kurzfristige Vorhersageprodukte aufgefüllt werden. Darüber hinaus sind in einigen radarnahen Bereichen noch Clutterpixel zu erkennen. Eine bessere Erkennung und Eliminierung der verbleibenden Fehlpixel kann durch eine weitere Optimierung der Korrekturverfahren erreicht werden.

Abbildung 16 zeigt die mittleren Jahressummen des Niederschlags für den Zeitraum 2006 bis 2015 für drei verschiedene radarbasierte Analysen: auf der Basis der Echtzeitdaten aus RADOLAN und für die Reanalyseversionen 2016.003 und 2017.002. Zum Vergleich ist das REGNIE-Produkt gegeben, das auf interpolierten Bodendaten basiert. Im Vergleich zur Echtzeitvariante erkennt man eine deutliche Qualitätssteigerung. So konnten fehlerhafte Messungen und Artefakte wie Speichen, Clutter und fehlerhafte Strukturen im Nahbereich der Radarsysteme größtenteils korrigiert werden. Die Reduzierung der Absolutwerte in den Reanalysen im Vergleich zur Echtzeitvariante RADOLAN ist durch die Umstellung des Kompositverfahrens begründet. Gegenüber REGNIE sind die Niederschlagswerte insbesondere in den Gebirgsregionen reduziert. Die Ursache hierfür liegt in den schwierigen Messbedingungen bei den Radarmessungen aber auch im REGNIE-Verfahren begründet, das die Niederschläge entsprechend der Höhenlage bei der Interpolation verstärkt.

Die Karten der mittleren Jahresniederschläge basierend auf der zehnjährigen Radarklimatologie zeigt das gleiche Muster wie die Karte der mittleren Niederschläge basierend auf langjährigen Stationsreihen. Dies zeigt, dass bereits das verfügbare Beobachtungsintervall die großflächigen klimatischen Eigenschaften der Regionen gut widerspiegelt. Der große Vorteil des Datensatzes gegenüber den interpolierten Bodendaten zeigt sich hingegen erst in den extremwertstatistischen Auswertungen der radarbasierten Reanalyse. Vor allem die zeitliche und räumliche Analyse von kleinräumigen, konvektiven Starkregenereignissen ist erst durch die Radarmessung möglich.

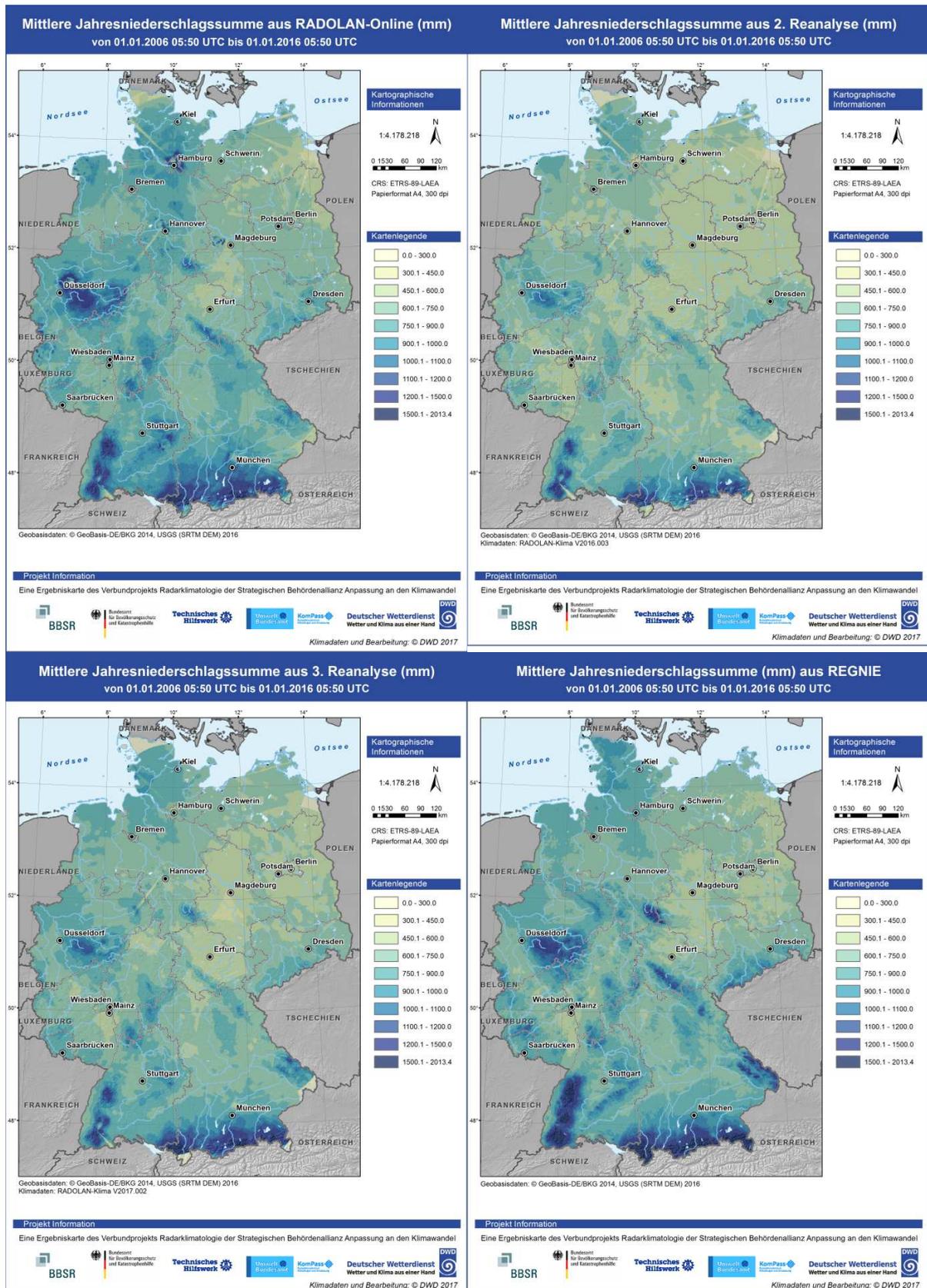


Abbildung 16: Vergleich der mittleren Jahresniederschläge aus RADOLAN-Online (*oben links*), aus den Reanalysen 2016.003 (*oben rechts*) und 2017.002 (*unten links*) und aus interpolierten Bodendaten (*unten rechts*).

c. Verifikation

Die Philosophie hinter der Erstellung der Radarklimatologie besagt, dass sämtliche verfügbaren Niederschlagsmessdaten in die Analyse eingehen. Dies hat allerdings zur Folge, dass keine direkten unabhängigen Messungen für eine Verifikation zur Verfügung stehen. Als Maß für die Güte der Radarklimadaten wurde daher ein Ensemble gerechnet und ausgewertet. Bei diesem Ansatz sind allerdings mehrere zeitaufwändige Reanalyserläufe notwendig, die mit verschiedenen Datenkollektiven rechnen. Im Rahmen der Projektarbeit konnten sechs Läufe realisiert werden.

In jedem Lauf wird eine definierte Anzahl an Stationen aus dem Datensatz, der zur Aneichung verwendet wird, entfernt, so dass diese unabhängigen Stationsdaten zur Verifikation herangezogen werden können. Zu diesem Zweck wurden in jedem der sechs Läufe jeweils 248 Tagesstationen ausgewählt und nicht im Aneichprozess der Reanalyse verwendet. Die Anzahl dieser Kontrollstationen entspricht dabei in etwa einem Drittel der 747 Tageswertstationen, die über den gesamten Zeitraum der Reanalyse zu mehr als 90 % verfügbar sind. Die Bestimmung der Kontrollstationen erfolgte mit dem RADOLAN-Modul zur Bestimmung der Kontrollstationen der Online-Verifikation. Ausgehend von einer willkürlich gewählten Station sucht ein Algorithmus die – in diesem Fall – drittnächste Station und fügt sie dem Kontrollstationskollektiv hinzu. Mit dieser Methode garantiert man eine deutschlandweite Verteilung der Stationen, die zur Verifikation herangezogen werden. Die sechs verschiedenen Kontrollstationskollektive wurden über die Bestimmung unterschiedlicher Anfangsstationen bestimmt. Der Anteil an identischen Stationen in den sechs Kollektiven beträgt im Mittel 43 %. Die Bestimmung der Kontrollstationen ist beispielhaft in Abbildung 17 dargestellt.

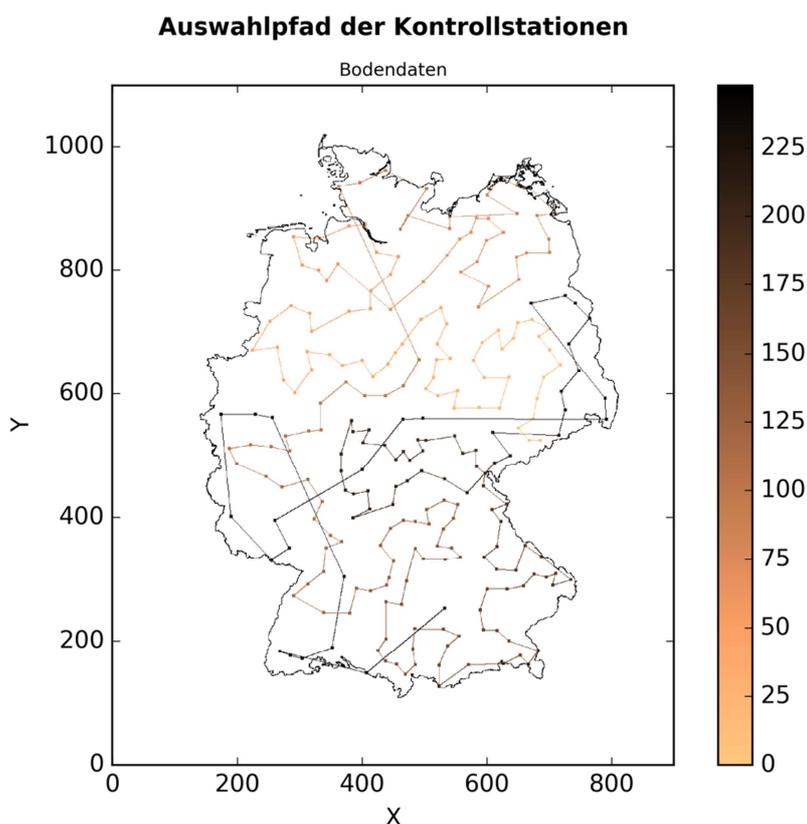


Abbildung 17: Beispielhafte Darstellung der Bestimmung eines Kollektivs an Kontrollstationen; die Farbskala zählt die Anzahl der ausgewählten Stationen entlang des Auswahlpfads beginnend mit der Station 0 in Sachsen bis zur Station 248 in Bayern.

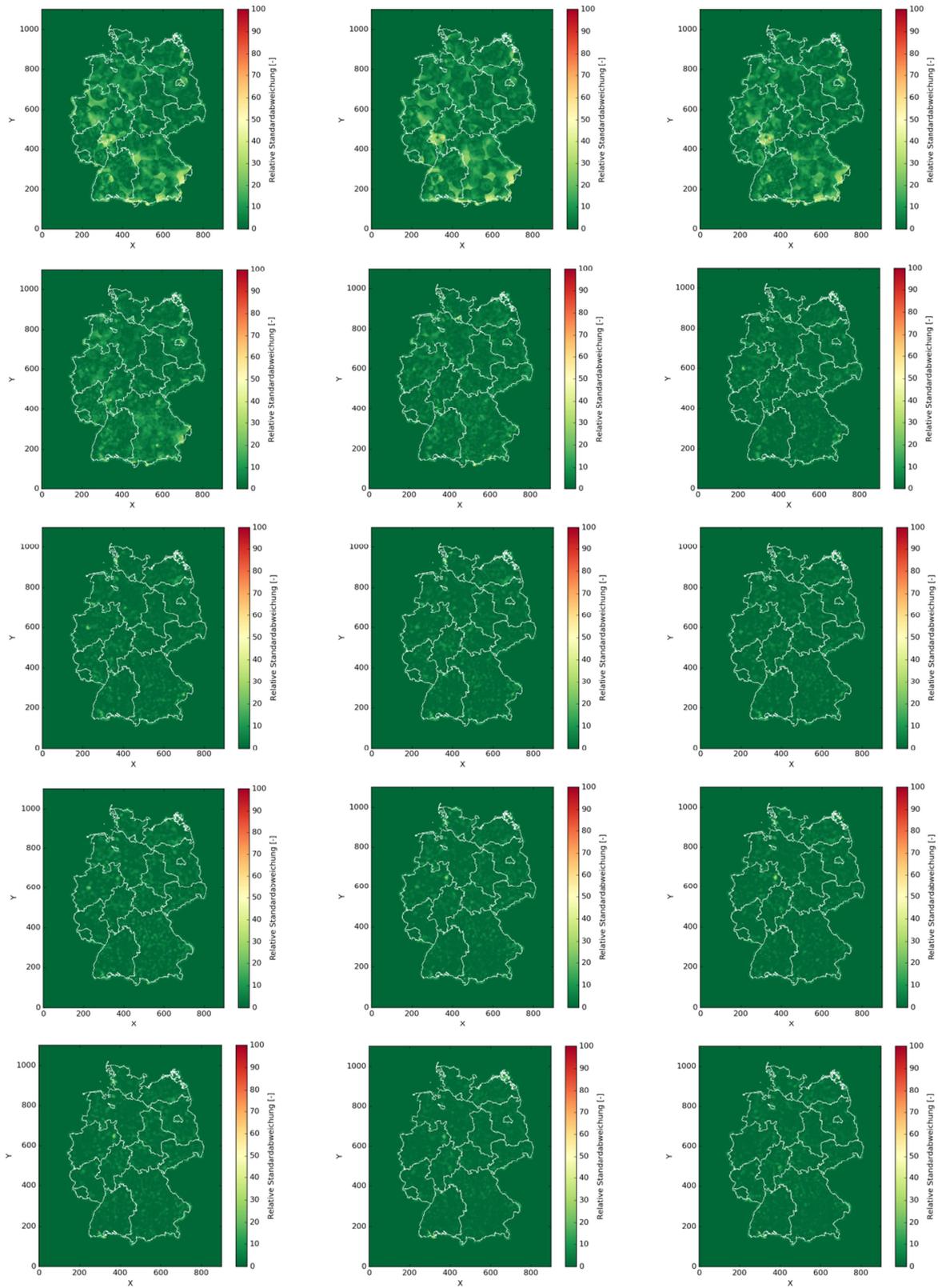


Abbildung 18: Relative Standardabweichung [%] der Jahresniederschlagssummen des Ensembles mit sechs Mitgliedern; zeilenweise von 2001 (*links oben*) bis 2015 (*rechts unten*).

Abbildung 18 zeigt die relative Standardabweichung für die einzelnen Jahresniederschlagssummen des Ensembles. Die Qualitätsverbesserungen der Ergebnisse über die Jahre ist deutlich zu erkennen. Während in den ersten Jahren noch größere Bereiche hohe Werte aufweisen, beschränken sich diese in den aktuelleren Jahren auf fehlerhafte Bereiche, z. B. innerhalb der Speiche im Nordwesten Hamburgs. Diese Qualitätsverbesserung ist zum einen auf die steigende Qualität der Radarmessungen und zum anderen auf die Zunahme der Anzahl automatischer Messstationen mit stündlicher Auflösung zurückzuführen.

Dies zeigt sich auch in Abbildung 19. Dargestellt ist der mittlere absolute Fehler zwischen den Stationswerten des Kollektivs und dem besten Radarpixelwert des Neunerfeldes für ein beispielhaftes Ensemblemitglied. Die grüne gestrichelte Linie gibt den Mittelwert über den Gesamtzeitraum der Radarklimatologie, die roten gestrichelten Linien geben den Mittelwert der ersten beziehungsweise zweiten Hälfte des Betrachtungszeitraums an.

Abbildung 20 zeigt die mittleren absoluten Fehler der einzelnen Kontrollstationen eines beispielhaften Ensemblemembers. Die Farben der Dreiecke geben den Absolutwert des Fehlers an. Zusätzlich zeigen die Größe und die Orientierung der Dreiecke die Tendenz der Fehlerentwicklung im Vergleich der zweiten Hälfte des Betrachtungszeitraums zur ersten. Es zeigt sich, dass an den meisten Stationen mit hohen Fehlerwerten eine Verbesserung der Datenqualität über die Jahre erreicht wurde. Hohe Werte treten insbesondere im Alpenraum auf, wo die Qualität sowohl der Radarmessungen aufgrund der großen Messhöhe als auch der Stationsmessungen im Gebirge generell geringer sind. Darüber hinaus sind die Fehlerwerte von den absoluten Niederschlagsmengen abhängig, die in der Alpenregion ebenfalls deutlich höher liegen.

Die Verifikation weist bereits auf eine gute Qualität der Radarklimatologie – Version 2 – hin. Da derartige umfangreiche Verifikationsstudien sehr zeitaufwändig sind, konnte diese für die aktuelle Reanalyseversion 3 im Rahmen des Projekts nicht realisiert werden.

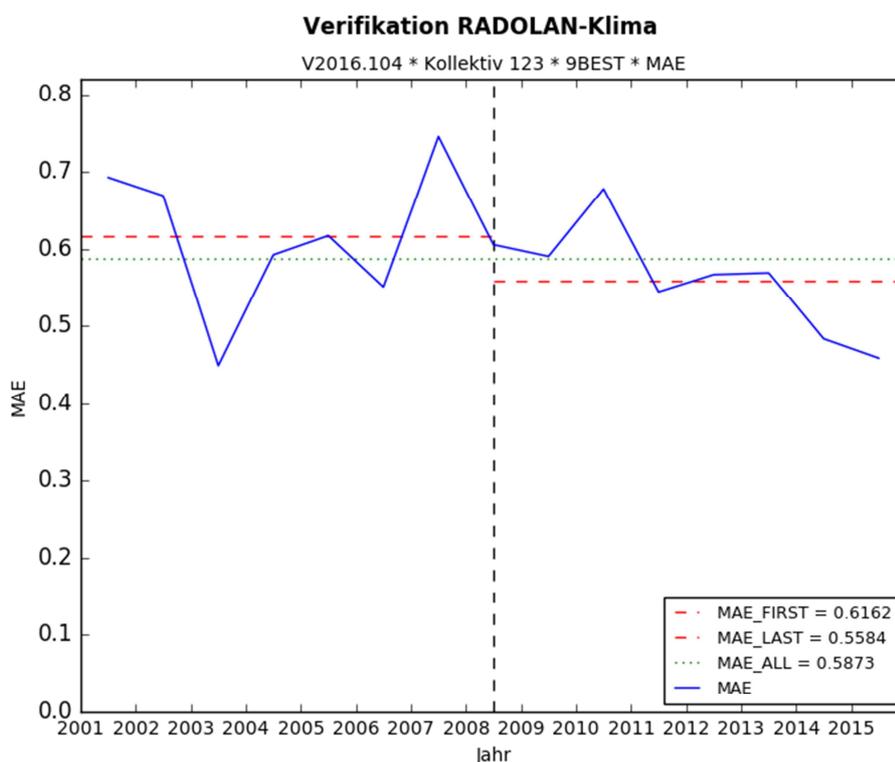
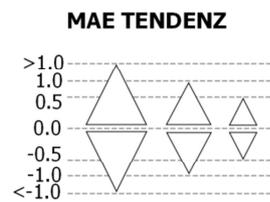
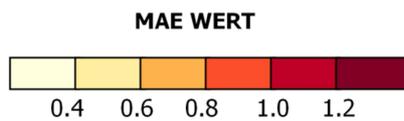
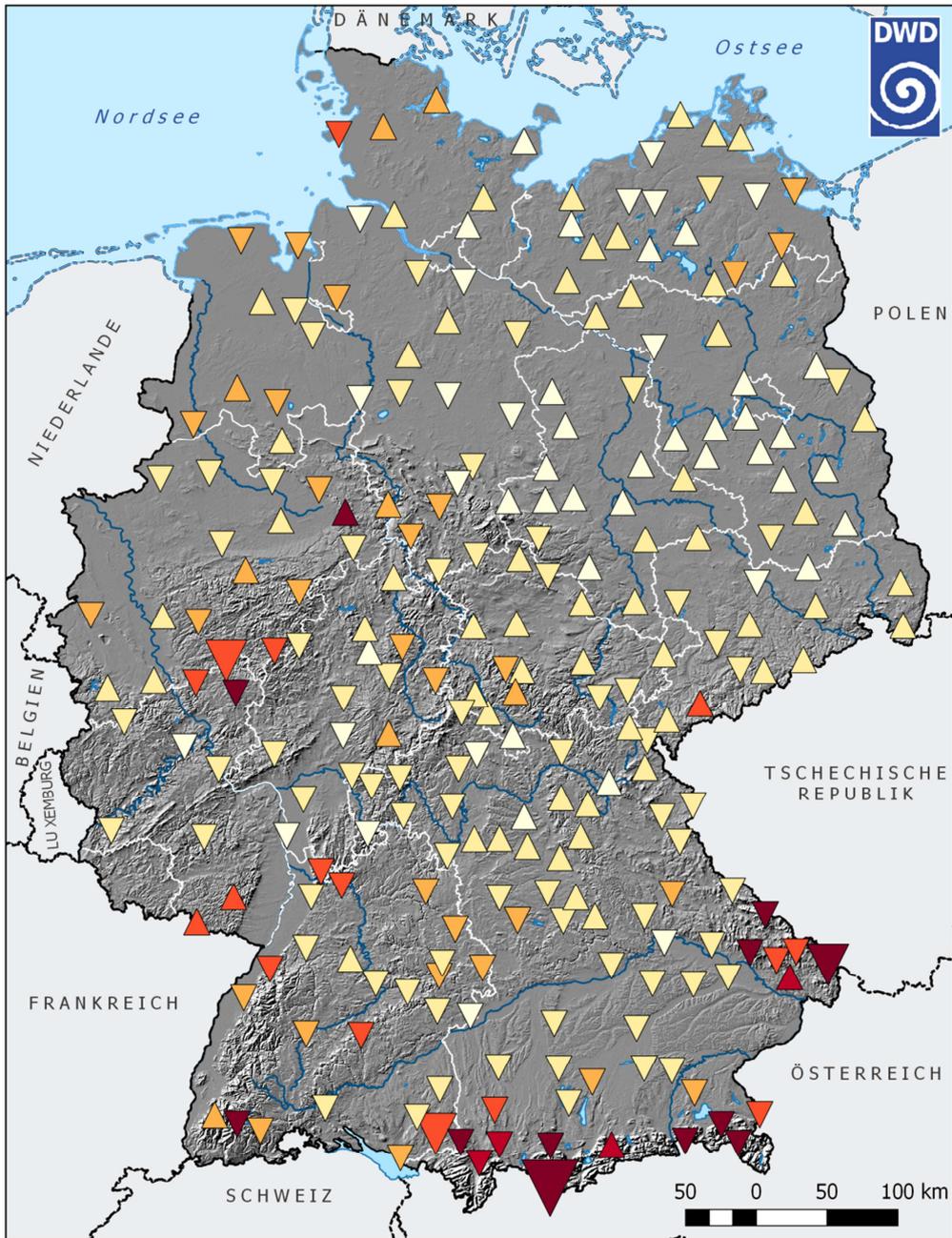


Abbildung 19: Mittlerer absoluter Fehler eines Ensemblemembers über den Zeitraum 2001 bis 2016. Die Verifikation erfolgte zwischen den Stationswerten und dem jeweils besten Radarpixel der Neunerumgebung.

Verifikation Radarklimatologie - MAE 2016.104 - Kollektive 123



Klimadaten und Darstellung: © DWD 2016
Geobasisdaten: © GeoBasis-DE/BKG 2014

Abbildung 20: Wert (Farbskala) und Tendenz (Größe und Orientierung der Dreiecke) des mittleren absoluten Fehlers der Kontrollstationen eines beispielhaften Ensembles.

d. Überschreitungen / Hot Spots

Methodik

Um die Regionen herauszuarbeiten, in denen innerhalb der letzten 16 Jahre (Stark-) Niederschläge gefallen sind, wurden die hoch aufgelösten Datenreihen ausgewertet und Überschreitungen gezählt. Unterschieden wird zwischen der Gesamtzahl der Stunden und der Anzahl unabhängiger Ereignisse (nach DWA-A 531) oberhalb eines definierten Schwellwerts. Als Schwellwerte wurden absolute Werte des Niederschlags verwendet. Da extreme Niederschlagswerte bezogen auf verschiedene Dauerstufen auftreten können, wurde darüber hinaus eine Auswertung durchgeführt, die die Überschreitungen der verschiedenen Warnschwellen des Deutschen Wetterdienstes kombiniert. Unterschieden wird dabei in Starkregen kurzer und Dauerregen langer Dauerstufen sowie in drei Kategorien, die den Warnstufen des DWD entsprechen.

Ergebnisse und Diskussion

Abbildung 21 zeigt den prozentualen Anteil an Stunden mit Niederschlag im Gesamtzeitraum. Die Niederschlagshäufigkeit spiegelt im Großen und Ganzen die Topographie Deutschlands wider, aber auch z. B. die Nordseeküste zeigt, verglichen mit dem Umland, erhöhte Werte. In Sachsen-Anhalt und Teilen von Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern erstreckt sich ein Band geringer Niederschlagshäufigkeit.

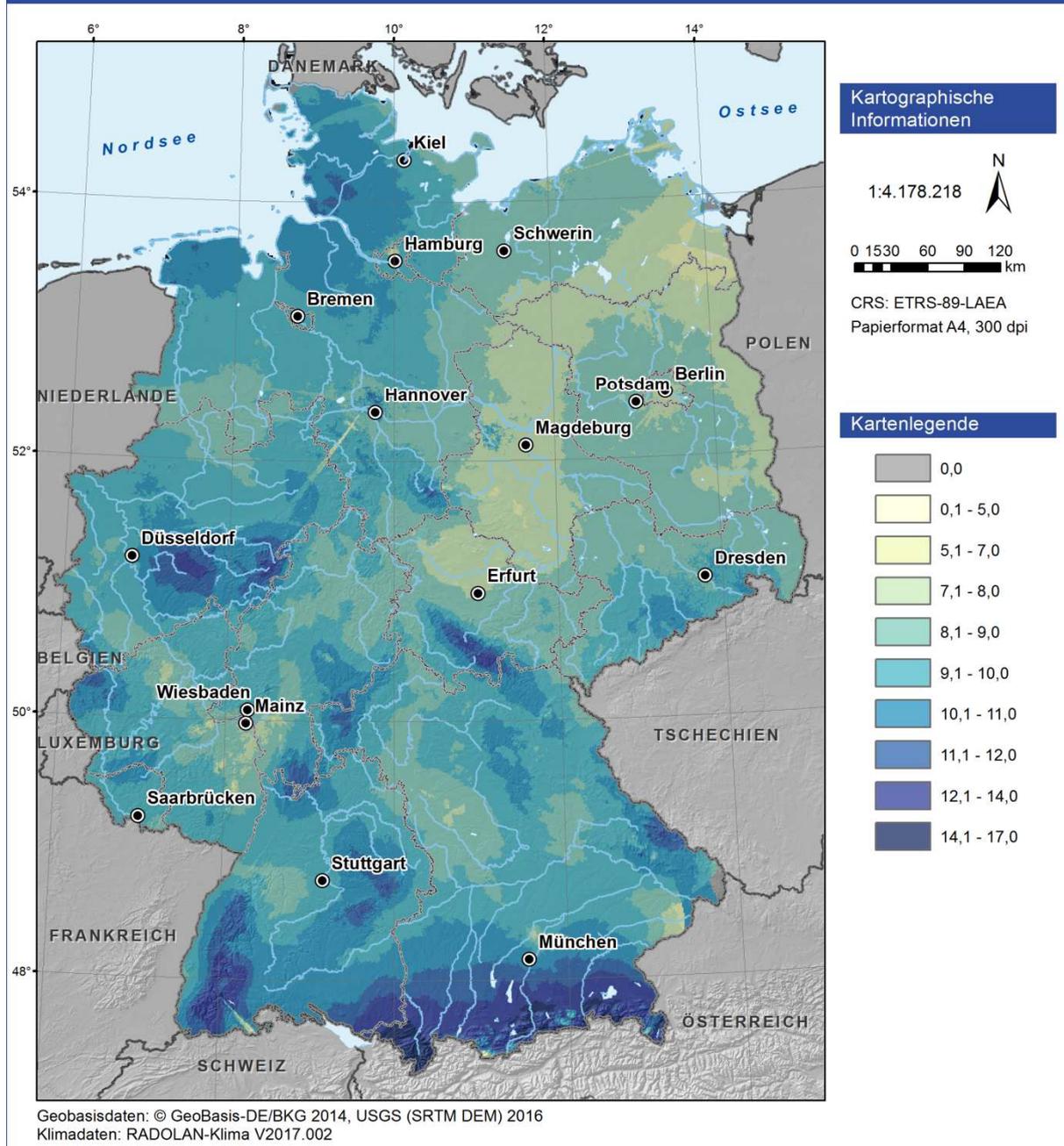
In einigen Regionen deutet die Abbildung darauf hin, dass die Messungen in großer Entfernung vom Radarstandort und damit in größerer Höhe nicht nur reduziert sind, sondern z. T. keinen Niederschlag messen. Diesen Effekt erkennt man im Osten des Münchner Radars sowie nordöstlich des Berliner Radars, wo Strukturen der ringförmigen Radarbegrenzung zu erkennen sind. Misst ein Radar keinen Niederschlag, so greift auch die multiplikative Korrektur (Abschnitt 4a) nicht. In diesen Regionen ist die Qualität der radarbasierten Auswertungen folglich schlechter als in den innenliegenden Gebieten mit mehrfachen Radarüberlappungen.

Abbildung 22 bis Abbildung 25 zeigen die Überschreitungen der Warnschwellen des Deutschen Wetterdienstes innerhalb der Zeitspanne 2001 bis 2016. Hierbei wurden jeweils die Warnschwellen für Dauerregen, die Absolutwerte des Niederschlags bezogen auf die Dauerstufen von zwölf bis 72 Stunden betrachten, sowie Starkregen für Dauerstufen von einer bis sechs Stunden für die drei Warnstufen zwei bis vier ausgewertet. Die räumliche Verteilung der Ergebnisse für die Auswertungen auf Stunden- und Ereignisbasis ist ähnlich. Großräumige Einzelereignisse mit langer charakteristischer Dauerstufe wie die Starkniederschlagsereignisse im Raum Münster/Osnabrück im Jahr 2010 sowie im Kontext des Elbehochwassers 2002, die bei Betrachtung der Stunden sehr dominant erscheinen, werden auf Ereignisbasis hingegen deutlich reduziert. Die Schlussfolgerungen sind bei beiden Betrachtungsweisen identisch.

Betrachtet man die Warnstufe 2 (markantes Wetter) mit geringen Schwellwerten, so spiegeln sowohl die Analyse des Dauerregens als auch des Starkregens die Topographie Deutschlands wider. Für die Warnstufen 3 und 4 (Unwetter und extremes Unwetter) bleibt die Bindung der Ergebnisse an die Höhenlagen für den Dauerregen weitestgehend bestehen und wird zusätzlich von Einzelereignissen ergänzt. Im Falle der Starkregenwarnung erkennt man ab Warnstufe 3 eine Ablösung der Maxima von den topographischen Strukturen. Die Extremereignisse kurzer Dauerstufen, also kurzlebige lokale Starkregenereignisse, sind im betrachteten Zeitraum nahezu in allen Regionen Deutschlands aufgetreten.

Die dargestellten Karten zeigen keine statistischen Auswertungen, sondern Auszählungen der Daten über den Zeitraum von 16 Jahren. Während sich beim großräumigen Dauerregen bereits klimatologische Strukturen zeigen, ist der Einfluss von Einzelereignissen auf die räumlich hoch aufgelösten Strukturen im Falle des Starkregens ausgeprägter.

Anteil der Stunden (%) im Gesamtzeitraum mit Niederschlag ≥ 0.1 mm von 01.01.2001 05:50 UTC bis 01.01.2017 05:50 UTC



Projekt Information

Eine Ergebniskarte des Verbundprojekts Radarklimatologie der Strategischen Behördenallianz Anpassung an den Klimawandel



Klimadaten und Bearbeitung: © DWD 2017

Abbildung 21: Prozentualer Anteil der Stunden mit Niederschlag im Gesamtzeitraum.

DAUERREGEN

Gesamtanzahl der Niederschlagsereignisse im Zeitraum 2001-2016 mit Überschreitung der Warnschwellen

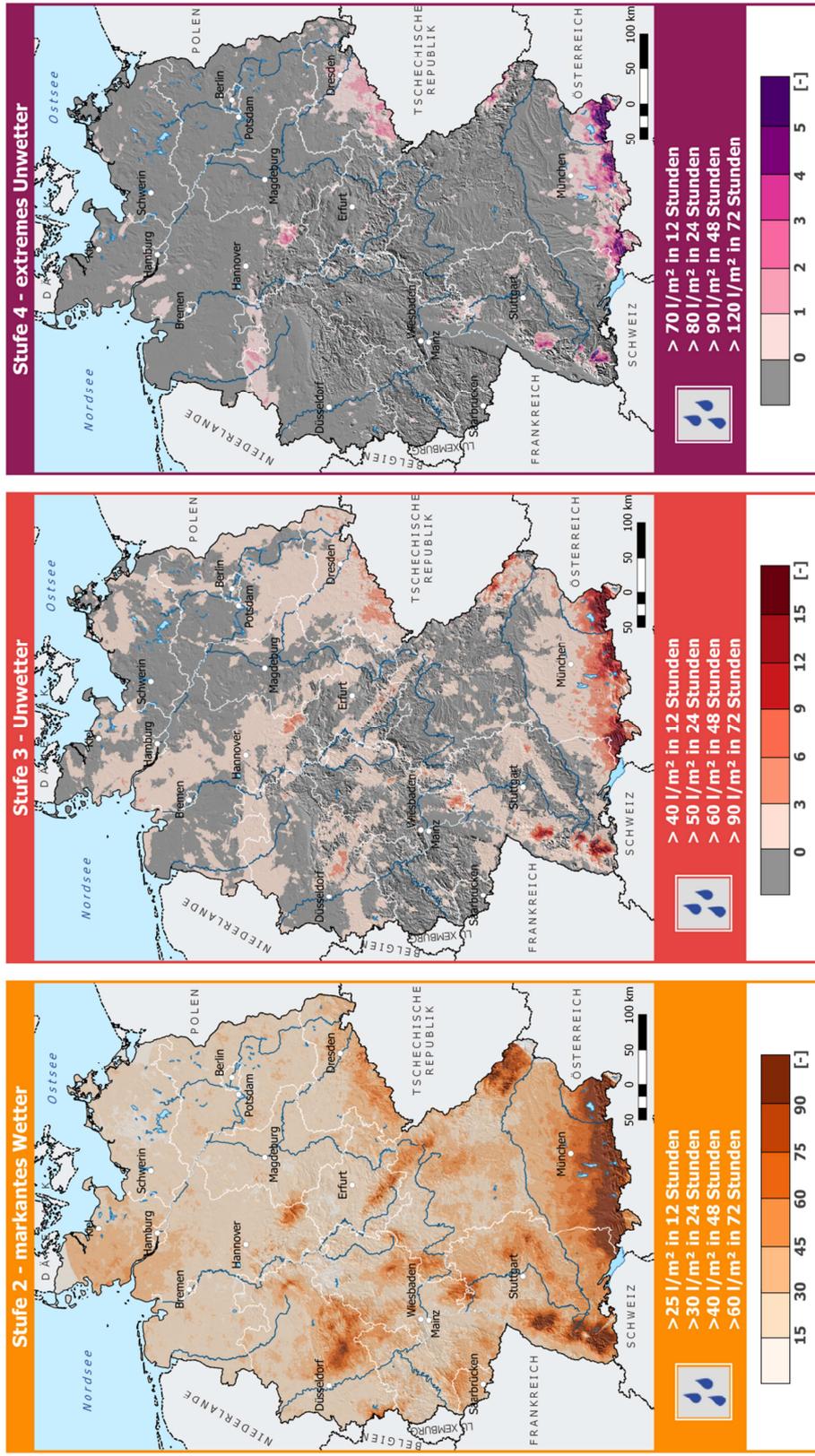


Abbildung 22: Gesamtanzahl der unabhängigen Ereignisse, die die Warnschwellen des Deutschen Wetterdienstes für Dauerregen im Zeitraum 2001 bis 2016 überschritten haben.

DAUERREGEN

Gesamtanzahl der Niederschlagsstunden im Zeitraum 2001-2016 mit Überschreitung der Warnschwellen

DWD

Geobasisdaten: © Geobasis-DE/BKG 2014. Klimadaten und Darstellung: © DWD 2017 (Radarklimatologie V2017.002)

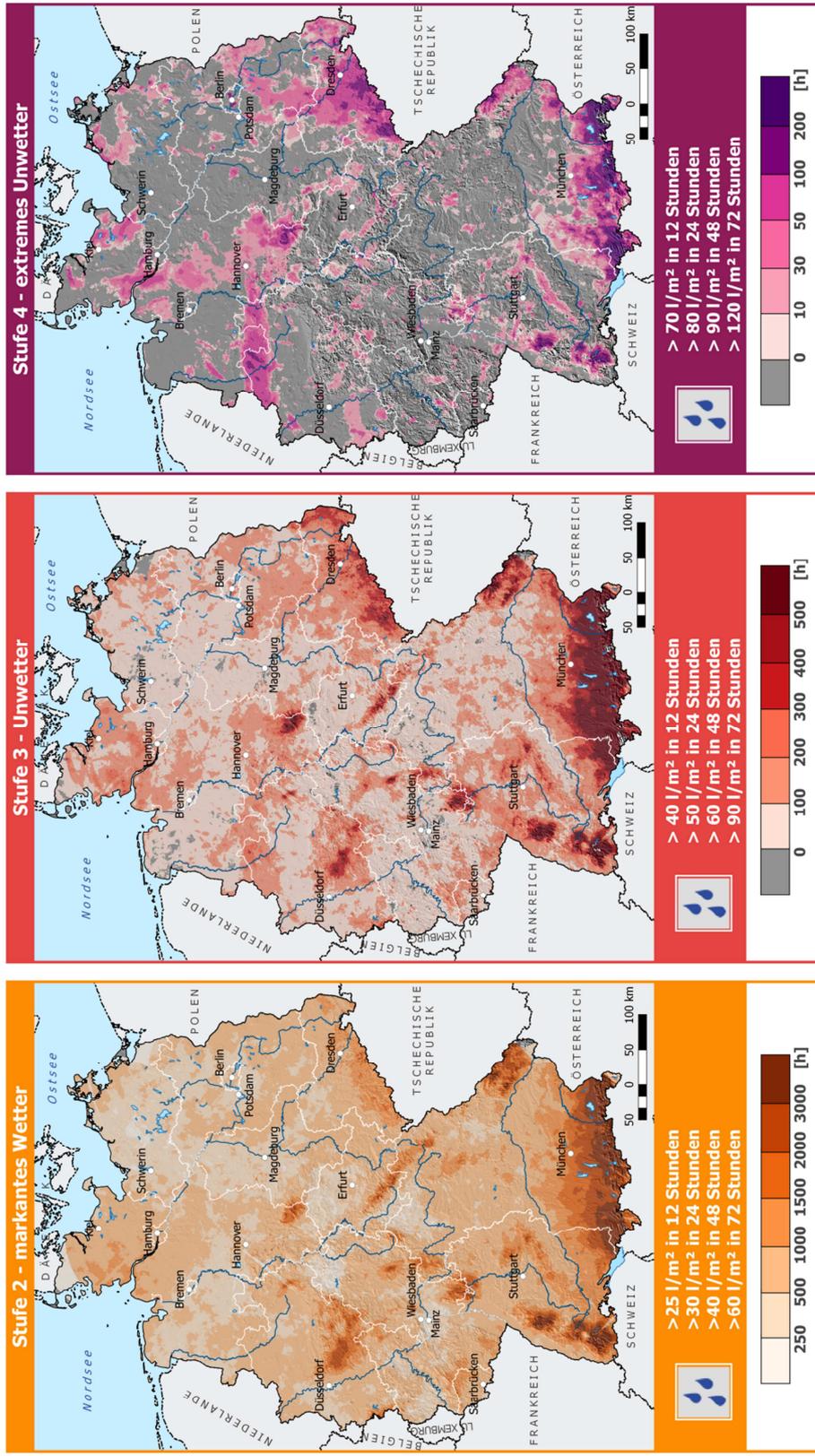
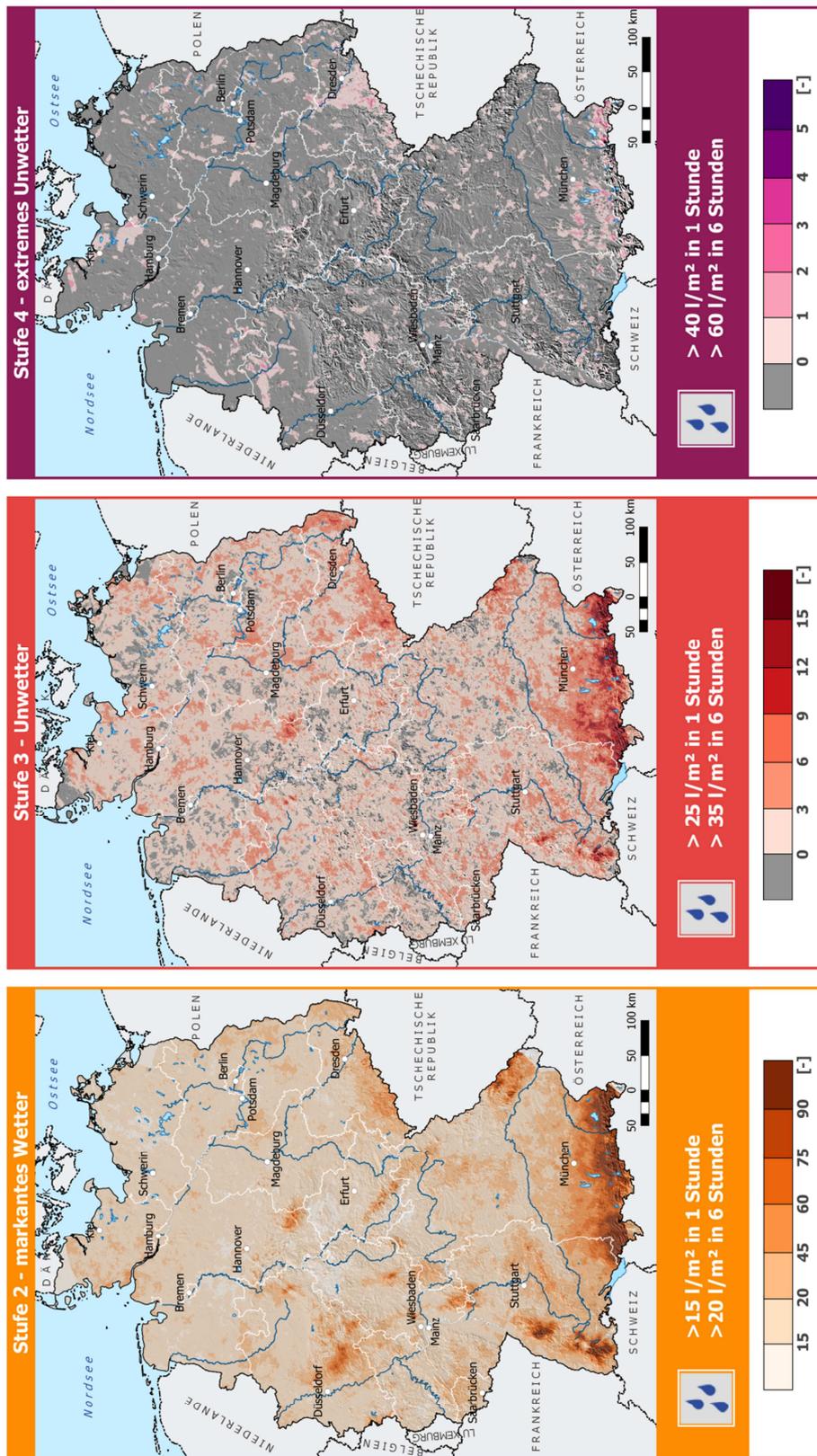


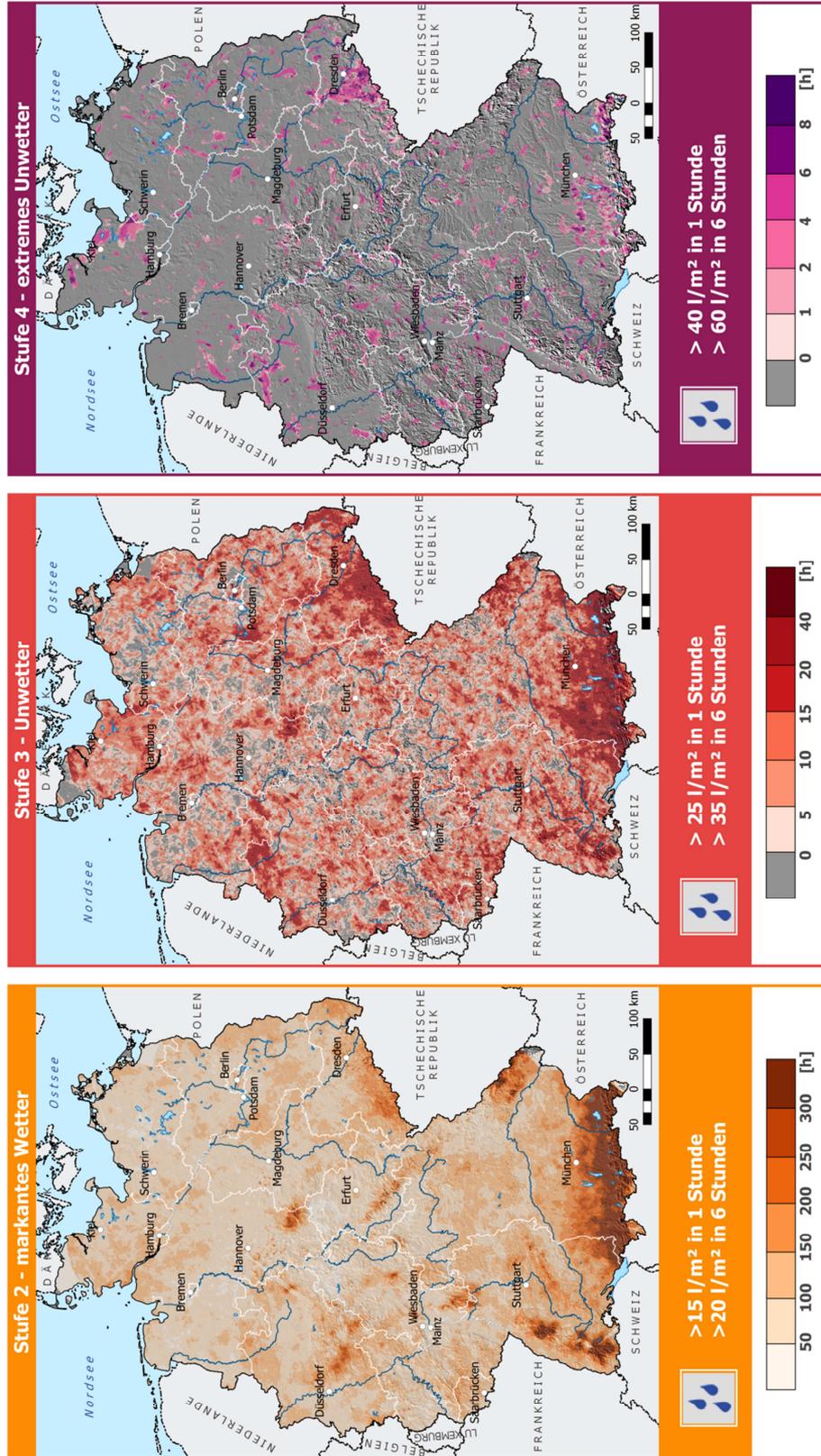
Abbildung 23: Gesamtanzahl der Stunden, in denen die Warnschwellen des Deutschen Wetterdienstes für Dauerregen im Zeitraum 2001 bis 2016 überschritten wurden.

STARKREGEN

Gesamtanzahl der Niederschlagsereignisse im Zeitraum 2001-2016 mit Überschreitung der Warnschwellen



Gesamtanzahl der Niederschlagsstunden im Zeitraum 2001-2016 mit Überschreitung der Warnschwellen
STARKREGEN



e. Statistischer Niederschlag

Methodik

Der statistische Niederschlag gibt die Niederschlagshöhe pro Dauerstufe an, die im betrachteten Zeitraum im Mittel eine Auftretshäufigkeit entsprechend der Wiederkehrzeit besaß. Die statistischen Niederschläge basieren auf einer extremwertstatistischen Auswertung. Der Deutsche Wetterdienst berechnet die statistischen Niederschläge auf der Basis qualitätsgeprüfter langer Niederschlagszeitreihen als Basis für KOSTRA-DWD. Die Ergebnisse bilden die Grundlage für die Bemessung, z. B. bei der Dimensionierung hydraulischer Bauwerke.

Im Rahmen des Projekts Radarklimatologie wurden die statistischen Niederschläge auf der Basis der 16-jährigen Zeitreihen pixelweise ermittelt. Aufgrund der noch kurzen Zeitreihe sind die Ergebnisse nicht als statistisch belastbar anzusehen. Sie geben aber bereits jetzt einen Hinweis auf potenzielle Defizite der rein stationsbasierten Analyse bei der Betrachtung von Starkregenereignissen.

Zu Vergleichszwecken wurde ein Ansatz gewählt, der im Wesentlichen der Herleitung der KOSTRA-DWD-Werte entspricht. Aufgrund der hoch aufgelösten, flächendeckenden Messung mit nahezu einer Million Pixeln ist im Fall der Radardaten keine visuelle Überprüfung jedes einzelnen Ergebnisses möglich, so dass das Verfahren automatisiert werden musste. Ein kritischer Punkt in diesem Zusammenhang ist die Behandlung von Ausreißern, die sowohl durch fehlerhafte Messwerte als auch seltene Ereignisse generiert werden können. Eine korrekte Berücksichtigung der statistischen Ausreißer stellt eine große Herausforderung dar. Im Rahmen des Projekts wurde ein Programm entwickelt, das die Eliminierung einer variablen Anzahl an Ausreißern ermöglicht. Es hat sich bei der stichprobenartigen Analyse der Daten ergeben, dass eine Beschränkung auf maximal einen Ausreißer zu guten Ergebnissen führt. Nichtsdestotrotz ist zu berücksichtigen, dass Einzelereignisse potenziell einen großen Einfluss auf das Gesamtergebnis besitzen können.

Die Berechnung des statistischen Niederschlags erfolgte nach dem DWA-Arbeitsblatt 531 [DWA, 2012]. Die Auswertung erfolgte auf der Basis der 33 ranghöchsten Niederschlagssummen der partiellen Serien. Der Ausgleich der Parameter u und w über die Dauerstufen erfolgte aufgrund der Beschränkung auf Dauerstufen von maximal 72 Stunden in einem einzelnen Segment unter Anwendung des doppelt-logarithmischen Ansatzes. Darüber hinaus wurde auf mit der Dauerstufe monoton fallende Regenspenden geprüft. Die Definition eines (statistischen) Ausreißers wurde folgendermaßen festgelegt. Als Maß wurde die absolute Differenz jedes Pixels zum ermittelten Funktionswert bestimmt:

$$Err(X) = |X - f(X)|.$$

Überschreitet der Fehlerwert des jeweils ranghöchsten Pixels den Median des Fehlerwerts über alle Pixel der Statistik um einen definierten Wert r , so wird das Pixel als Ausreißer definiert und aus der Statistik entfernt:

$$Err(X_1) / \text{median}(Err(X_i)) > r.$$

Die nachfolgenden Ränge steigen um einen Rang auf und bilden die Grundlage für die erneute Auswertung. Auf diese Weise können sukzessive mehrere Ausreißer entdeckt und aus der Statistik entfernt werden.

Der Schwellwert r wurde im Rahmen der präsentierten Auswertungen auf den Wert 3 festgesetzt und die Eliminierung von Ausreißern auf maximal einen Ausreißer beschränkt.

Statistische Niederschläge wurden für Dauerstufen zwischen einer und 72 Stunden sowie für Wiederkehrzeiten zwischen einem und 100 Jahren erstellt. Als Basis dienten die angeeichten Stundensummen aus dem RW-Produkt.

Ergebnisse und Diskussion

Abbildung 26 zeigt beispielhaft die statistischen Niederschläge für eine Dauerstufe von 24 Stunden und eine Wiederkehrzeit von einem Jahr sowie für die Dauerstufe von einer Stunde und der Wiederkehrzeit von 20 Jahren. Zum Vergleich sind die statistischen Niederschläge gegeben, die auf der Basis langjähriger Stationszeitreihen ermittelt wurden und in KOSTRA-DWD Verwendung finden.

Die Absolutwerte der Ergebnisse sind nicht direkt miteinander vergleichbar, da neben den unterschiedlichen Messperioden auch sehr unterschiedliche Messeinheiten vorliegen. Während die Radarmessung einen Mittelwert einer Fläche von einem Quadratkilometer entspricht, liegen der stationsbasierten Auswertung Daten zu Grunde, die einem Messgerät mit einer Fläche von 200 cm² entstammen. Darüber hinaus werden zur Regionalisierung der Punktwerte vor allem die Merkmale der vorherrschenden Orografie verwendet. Aus diesen Gründen wird die Diskussion der Ergebnisse auf einen Vergleich der räumlichen Muster beschränkt.

Die Ergebnisse für die lange Dauerstufe und die kurze Wiederkehrperiode weisen ähnliche räumliche Strukturen auf. Wie bereits bei den Überschreitungen und Hot Spots erkennt man auch in den statistischen Auswertungen den Zusammenhang mit der Topographie. Im Gegensatz dazu unterscheiden sich die Ergebnisse für die kurze Dauerstufe und lange Wiederkehrperiode signifikant voneinander. Auch in den statistischen Niederschlägen liefert die Auswertung der radarbasierten Messungen ein deutlich weniger an das Relief angegliedertes räumliches Verteilungsmuster. Besonders deutlich wird diese „Ablösung“ von den orografischen Strukturen bei der Betrachtung des Zooms auf Baden-Württemberg (Abbildung 27). Insbesondere im nördlichen Schwarzwald sind die Werte deutlich geringer, während die Schwäbische Alb deutlich als Hot-Spot-Region auszumachen ist.

Abbildung 28 und Abbildung 29 zeigen die statistischen Niederschläge für die Dauerstufe von einer Stunde und einer Wiederkehrzeit von einem Jahr für die Stadt Köln, wiederum auf Basis der Radarklimatologie (2017.002) sowie auf Basis der langjährigen Stationszeitreihen. Die Ergebnisse der Radarklimatologie zeigen eine leichte Zunahme des statistischen Niederschlagswerts in Richtung Südosten der Stadt Köln, aber auch lokale Maxima, z. B. nördlich des Zentrums. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Daten auf Basis der Stationsmessungen aufgrund der geringen räumlichen Auflösung keine detaillierte Unterscheidung der einzelnen Stadtteile ermöglicht. Auch werden Gebiete mit unterschiedlichem Höhenprofil, z. B. im Übergang zum Bergischen Land, zusammengefasst. Die Radarklimatologie mit einer Auflösung von einem Quadratkilometer ermöglicht die Erarbeitung kleinräumiger klimatischer Unterschiede und erlaubt somit eine räumlich detailliertere Bestimmung der statistischen Niederschläge für die Anwendung im urbanen Raum.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse für die statistischen Niederschläge ist zu berücksichtigen, dass die Zeitreihen für eine belastbare extremwertstatistische Auswertung derzeit noch sehr kurz sind. Nichtsdestotrotz deuten die Ergebnisse deutlich darauf hin, dass die Erfassungsproblematik des Stationsmessnetzes bei kleinräumigen Starkniederschlägen einen großen Einfluss auf die Statistik besitzt und die Radarmessungen einen neuen Einblick auf die zu Grunde liegenden Prozesse geben.

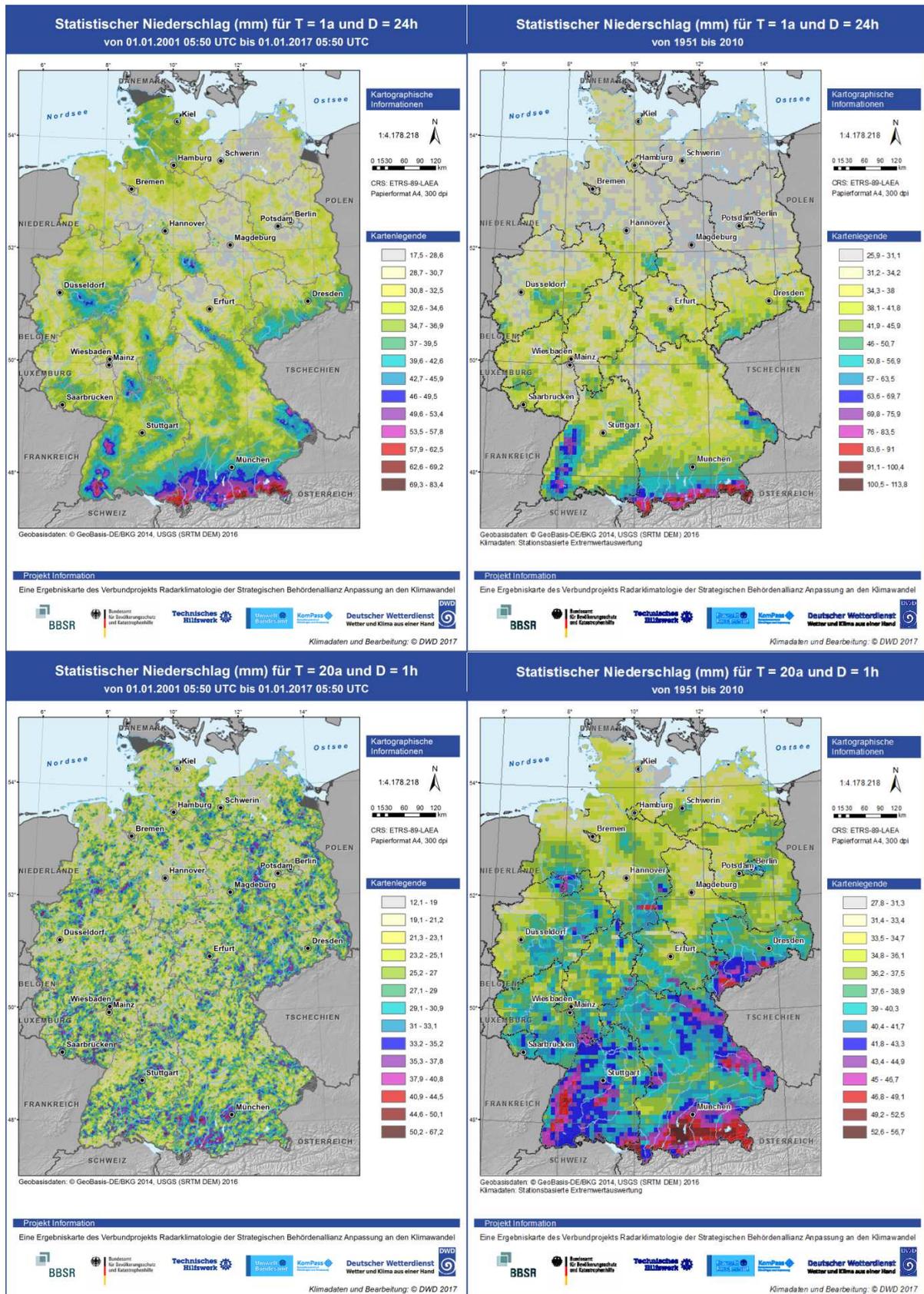
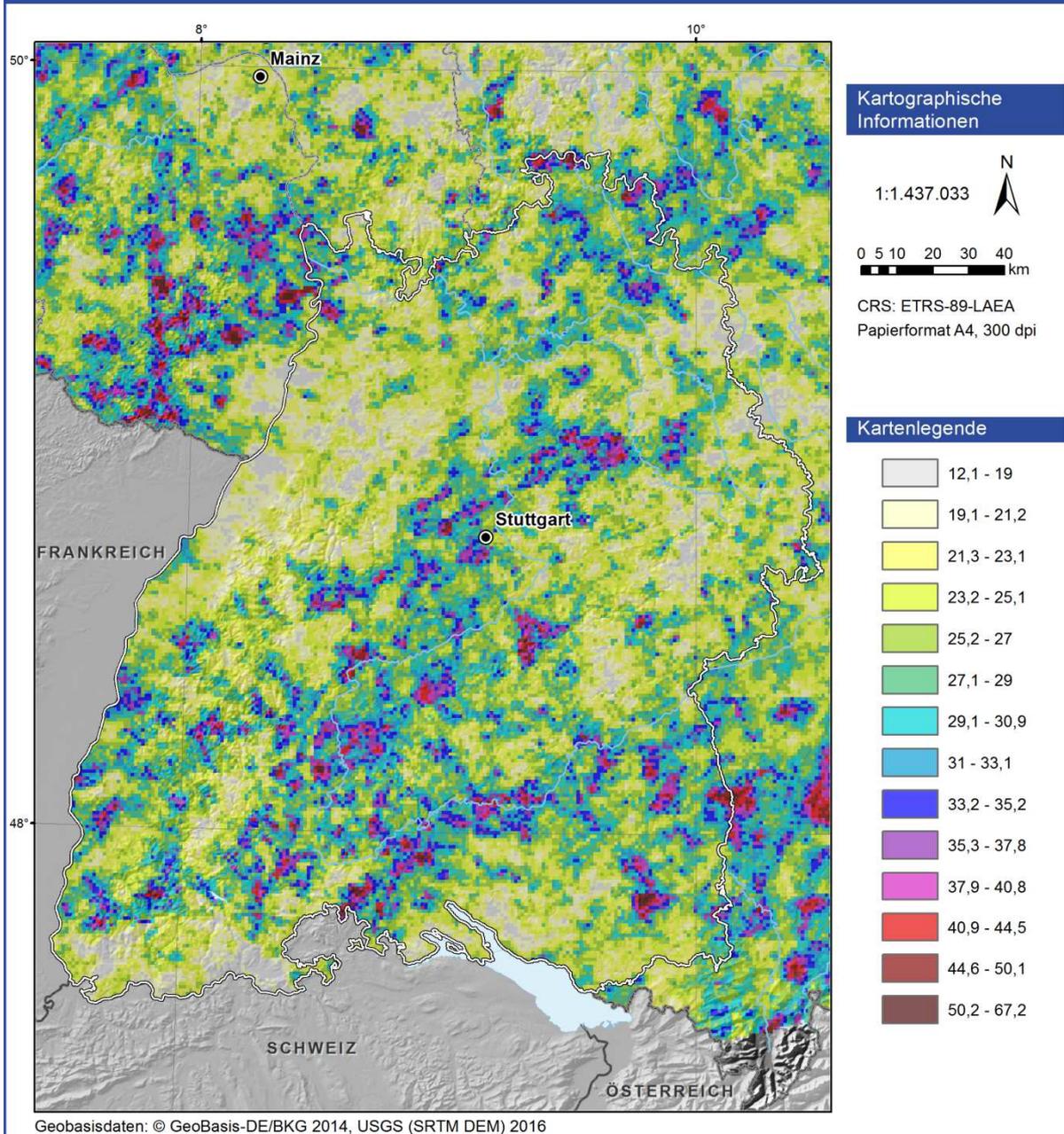


Abbildung 26: Statistische Niederschläge auf Basis der Radarklimatologie (*links*) und auf Basis langjähriger Stationszeitreihen (*rechts*).

Statistischer Niederschlag (mm) für T = 20a und D = 1h von 01.01.2001 05:50 UTC bis 01.01.2017 05:50 UTC



Projekt Information

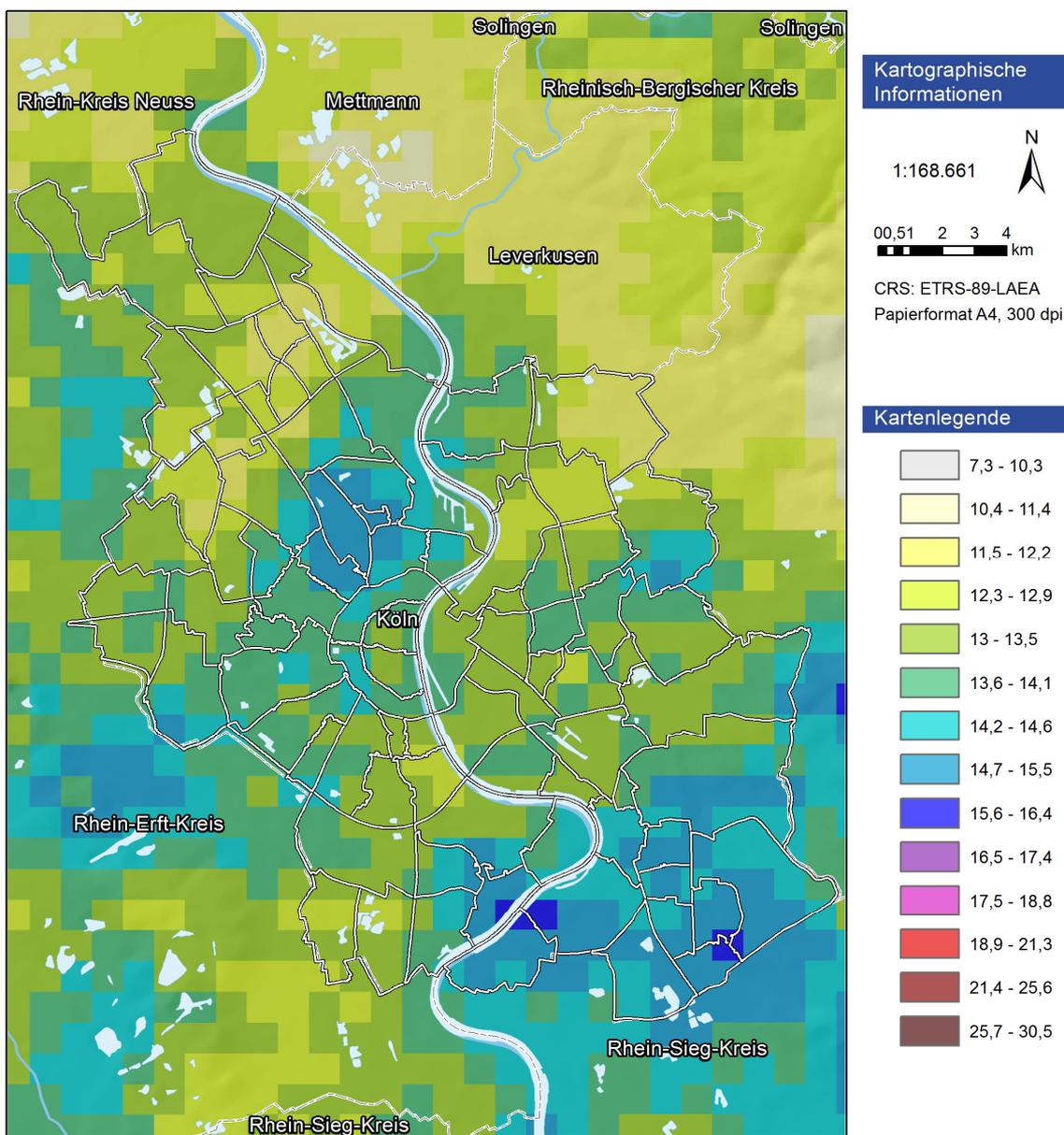
Eine Ergebniskarte des Verbundprojekts Radarklimatologie der Strategischen Behördenallianz Anpassung an den Klimawandel



Klimadaten und Bearbeitung: © DWD 2017

Abbildung 27: Statistischer Niederschlag auf Basis der Radarklimatologie, Zoom auf Baden-Württemberg.

Statistischer Niederschlag (mm) für T = 1a und D = 1h von 01.01.2001 05:50 UTC bis 01.01.2017 05:50 UTC



Klimadaten und Darstellung: © DWD 2016
 Geobasisdaten: © GeoBasis-DE/BKG 2014, USGS (SRTM DEM) 2016
 Köln-PLZ-Gebiete: CC BY 3.0 DE, www.offenedaten-koeln.de

Projekt Information

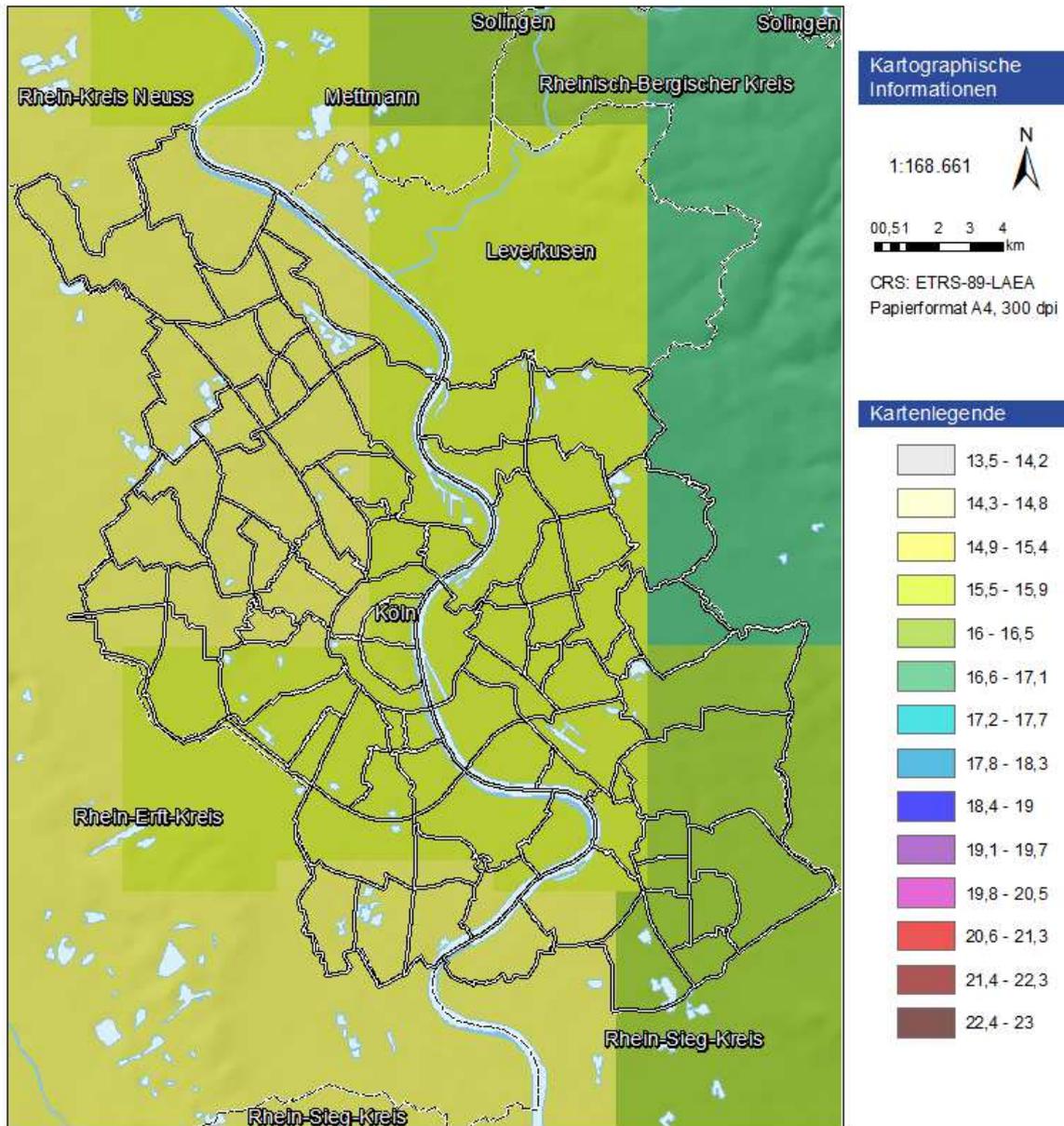
Eine Ergebniskarte des Verbundprojekts Radarklimatologie der Strategischen Behördenallianz Anpassung an den Klimawandel



Klimadaten und Bearbeitung: © DWD 2017

Abbildung 28: Statistischer Niederschlag auf Basis der Radarklimatologie für Köln.

Statistischer Niederschlag (mm) für T = 1a und D = 1h von 1951 bis 2010



Geobasisdaten: © GeoBasis-DE/BKG 2014, USGS (SRTM DEM) 2016
Klimadaten: Stationsbasierte Extremwertauswertung

Projekt Information

Eine Ergebniskarte des Verbundprojekts Radarklimatologie der Strategischen Behördenallianz Anpassung an den Klimawandel



Klimadaten und Bearbeitung: © DWD 2017

Abbildung 29: Statistischer Niederschlag auf Basis langjähriger Stationszeitreihen für Köln.

f. R-Faktor der ABAG

Methodik

Die Allgemeine Bodenabtragungsgleichung (ABAG) ermöglicht die Bestimmung der Erosionsgefährdung landwirtschaftlich genutzter Ackerflächen über die Multiplikation sechs flächenspezifischer Faktoren:

$$A = R \cdot K \cdot S \cdot L \cdot C \cdot P$$

mit

A = mittlerer Bodenabtrag in t/(ha · a)

R = Oberflächenabfluss- und Regenerositätsfaktor in N/(h · a)

K = Bodenerodierbarkeitsfaktor in (t · h)/(ha · N)

S = Hangneigungsfaktor

L = Hanglängenfaktor

C = Bodenbedeckungs- und -bearbeitungsfaktor

P = Faktor zur Berücksichtigung von Erosionsschutzmaßnahmen.

Dabei handelt es sich bei dem R-Faktor um eine rein meteorologische Größe, die sich aus der kinetischen Energie des erosionswirksamen Regens bestimmt.

Die Berechnung des R-Faktors erfolgt angelehnt an die DIN 19708:2003 und wird über die Summe der kinetischen Energien aller erosionswirksamen Niederschlagsereignisse bestimmt. Als erosionswirksam betrachten wir Niederschlagsereignisse, die eine Niederschlagsmenge von mindestens 12,7 mm oder eine maximale Niederschlagsintensität I_{30} von mindestens 12,7 mm/h bezogen auf ein 30-Minuten-Intervall aufweisen. Die Schwellwerte entstammen der amerikanischen Universal Soil Loss Equation (USLE) und liegen geringfügig über den Werten der DIN mit 10 mm bzw. 10 mm/h. Einzelne Ereignisse sind durch ein niederschlagsfreies Zeitfenster von mindestens sechs Stunden getrennt.

Die kinetische Energie E eines Ereignisses berechnet sich aus den folgenden Formeln:

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

mit

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

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

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

Dabei sind:

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

I_i Intensität des Niederschlags im Zeitabschnitt i , in mm/h

N_i Niederschlagshöhe im Zeitabschnitt i , in mm

n Anzahl der Zeitschritte eines unabhängigen Ereignisses.

Der betrachtete Zeitabschnitt i entspricht der minimal verfügbaren zeitlichen Auflösung der auf den Radardaten basierenden Niederschlagszeitreihen.

Der R-Faktor eines Niederschlagsereignisses ergibt sich über das Produkt der kinetischen Energie des Ereignisses mit der maximalen 30-Minuten-Niederschlagsintensität:

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

mit

I_{30} maximale 30-Minuten-Niederschlagsrate, in mm/h

R_j R-Faktor eines Regenereignisses j , in N/h.

Der mittlere Jahres-R-Faktor R ergibt sich aus der Summe aller Ereignis-R-Faktoren dividiert durch die Anzahl der betrachteten Jahre:

$$R = \frac{1}{n_a} \sum_{j=1}^m R_j$$

mit

R mittlerer jährlicher R-Faktor, in N/(h·a)

n_a Länge der Zeitreihe, in a

m Anzahl der erosiven Niederschlagsereignisse der Zeitreihe.

Als Datengrundlage für die Berechnung der R-Faktoren wurden die angeeichten RW-Produkte mit einer zeitlichen Auflösung von 60 Minuten verwendet. Aus diesem Grund wurden die zeitschrittabhängigen Parameter I_{30} und E der Gleichung mit Korrekturfaktoren multipliziert, die auf der Basis von Analysen hoch aufgelöster Niederschlagszeitreihen ermittelt wurden (Fischer, 2016, *priv. Kommunikation*). Im Rahmen der vorliegenden Auswertungen wurden folgende Korrekturfaktoren verwendet:

$$I_{30} = I_{60} \cdot 2,13$$

$$E = E_{60} \cdot 1,12$$

Perspektivisch wird die Auswertung auf die minimale Auflösung der Radarmessung umgestellt werden, die fünf Minuten beträgt, um insbesondere eine bessere Abschätzung der Erosivität extremer Starkregenereignisse zu ermöglichen.

Jeder Rasterpunkt mit einer horizontalen Gitterweite von einem Kilometer in polarstereographischer Projektion ging separat in die Berechnungen ein. Insgesamt wurden die 16-jährigen Zeitreihen mit einer Auflösung von 60 Minuten an ca. einer Million Rasterpixeln analysiert. Hierbei wurde keine Unterscheidung zwischen Regen und Schnee unternommen, da diese auf der Basis der Radarmessungen mit einfacher Polarisation nicht direkt möglich ist. Aufgrund der topographischen und klimatischen Gegebenheiten in den meisten Teilen Deutschlands sehen wir die Annahme bei der Bestimmung langjähriger Mittelwerte als gerechtfertigt an, dass der Einfluss des Schneefalls auf den R-Faktor als gering eingeschätzt werden kann. Eine Ausnahme stellt womöglich der Alpenraum dar, in dem die Qualität der radarbasierten Produkte jedoch generell als geringer eingestuft werden muss.

Zur Bestimmung des mittleren Jahres-R-Faktors empfiehlt die DIN 19708:2003 die Betrachtung aktueller Zeitreihen von mindestens zehn Jahren Länge, so dass der Umfang der Radarklimatologie mit 16 Jahren als ausreichend für eine Abschätzung der deutschlandweiten Verteilung anzusehen ist. Um den Einfluss einzelner extremer Niederschlagsereignisse im Betrachtungszeitraum abzuschätzen, wurde das Verfahren zur Berechnung der R-Faktoren um eine Ausreißerkontrolle erweitert. In einem ersten Schritt werden die statistischen R-Faktoren entsprechend der DWA-A 531 äquivalent zu den statistischen Niederschlägen ermittelt. Anschließend werden alle R-Faktoren auf den Maximalwert entsprechend der geschätzten Wiederkehrzeit des ersten Ranges limitiert. Die Ausreißerbehandlung wurde bislang nur anhand von Stichproben getestet. In den Testfällen war der Einfluss der extremen Einzelereignisse auf das Gesamtergebnis vernachlässigbar, was darauf hindeutet, dass die räumliche Verteilung der R-Faktoren trotz der kurzen Zeitreihe nicht zu stark durch Einzelereignisse verfälscht wird. Umfangreiche Tests auf der Basis des kompletten Datensatzes stehen noch aus.

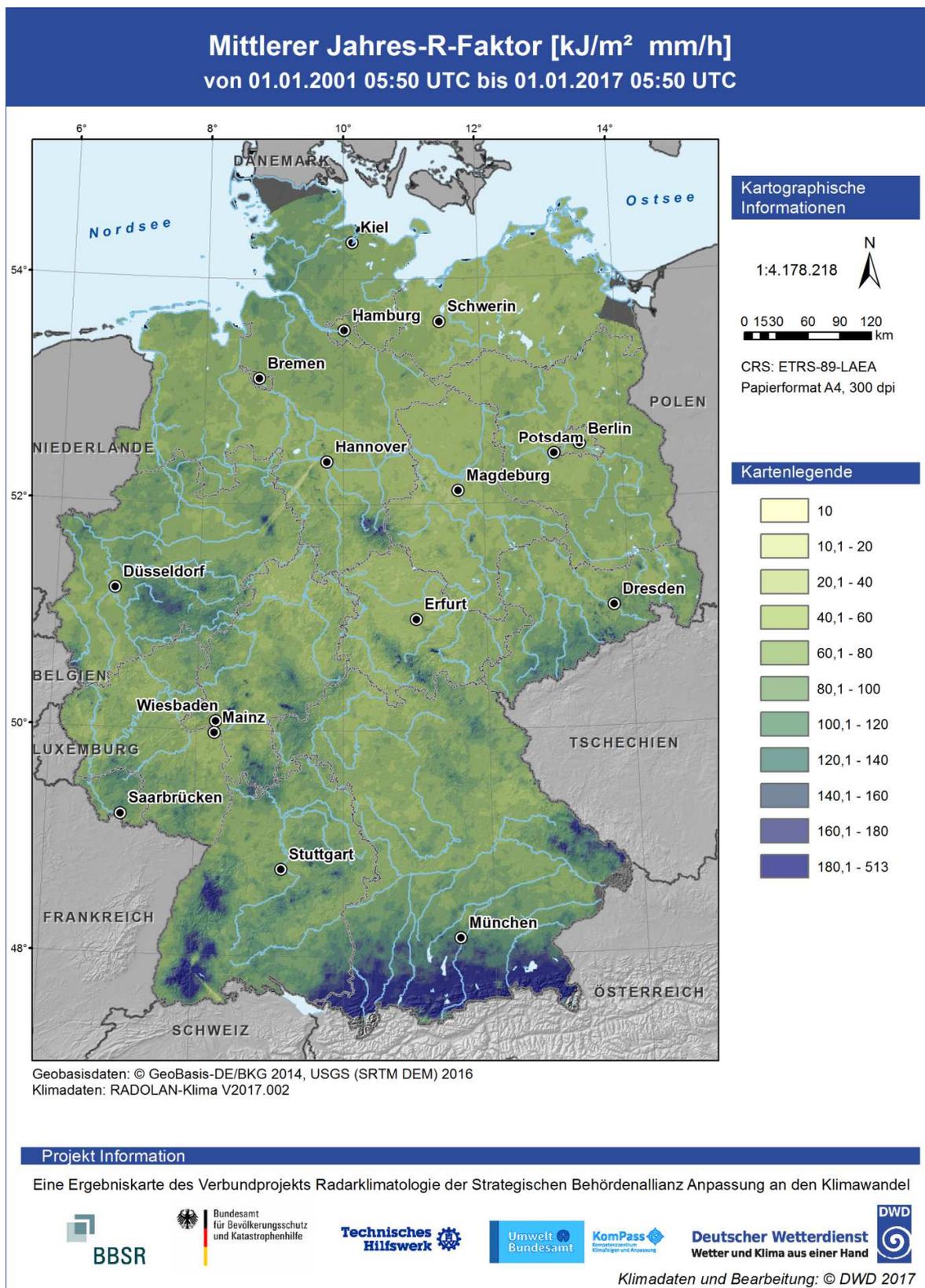


Abbildung 30: Mittlerer jährlicher R-Faktor auf Basis der stündlichen Niederschlagszeitreihen der Radarreanalyseversion 2017.002.

Ergebnisse und Diskussion

Abbildung 30 zeigt den mittleren jährlichen R-Faktor für Deutschland. Das Bild ähnelt in der Gesamtheit den Ergebnissen auf der Basis von Bodendaten mit klar erkennbaren Maxima im Bereich der Mittelgebirge und der Alpen. Die mittleren R-Faktoren werden insbesondere durch die zahlreichen Ereignisse mit kleinen und mittleren Erosivitäten bestimmt. Diese werden durch Ereignisse hervorgerufen, die i. d. R. auch durch das Bodenmessnetz detektiert werden. Extreme Einzelereignisse fallen durch die Mittelung über einen längeren Zeitraum hingegen nur wenig ins Gewicht. Neben dem mittleren jährlichen R-Faktor wurden R-Faktoren für definierte Zeitintervalle sowie die entsprechenden Mittelwerte über die 16-jährige Gesamtperiode bestimmt. Der vorliegende Datensatz umfasst die mittleren monatlichen sowie saisonalen R-Faktoren.

Der wachsende Einfluss der Extremereignisse und damit der Vorteil der Radardaten im Vergleich zu klassischen Bodenmessdaten zeigen sich bei der Betrachtung kürzerer Zeitreihen. Die Radardaten ermöglichen aufgrund der Erfassung der extremen, kleinräumigen, erosiven Ereignisse, die auf der Basis des Stationsnetzes nicht erfasst werden können, die Bestimmung einzelner – auch extremer – Ereigniserosivitäten. Dies zeigt sich in den deutlich heterogeneren Strukturen bei der Betrachtung kürzerer Zeitreihen, z. B. für Einzeljahre. Darüber hinaus ermöglicht der Datensatz eine detailliertere Analyse im Hinblick auf Einzelfalluntersuchungen, räumliche Strukturen oder jahreszeitliche Verläufe. Diese Untersuchungen sind nicht Bestandteil des Projekts Radarklimatologie. Die Daten werden aber im Rahmen universitärer Forschungsarbeiten, z. B. an der TU München, ausgewertet [Fischer, *priv. Kommunikation*].

g. Vorregenindex

Methodik

Der Vorregen- oder auch Vorfeuchteindex ist ein objektiviertes Maß für den auf der gefallen Niederschlagsmenge beruhenden Bodenwassergehalt für die Verwendung in hydrologischen Modellen. Bestimmt wird der Vorregenindex über die gewichtete Summe der vorangegangenen täglichen Niederschlagswerte, wobei die Gewichte mit der vergangenen Zeit abnehmen. Im Rahmen des Projekts wurden zwei Vorregenindizes entsprechend den Angaben des Ministeriums für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten Rheinland-Pfalz berechnet: ein Vorregenindex, der die Niederschläge bis zu 30 Tage vor dem aktuellen Datum einbezieht (VN30), sowie der Vorregenindex nach Zaiß (1989), der bis 21 Tage zurückgeht und zusätzlich eine Abhängigkeit der potenziellen Verdunstung von der Jahreszeit berücksichtigt. Beide Indizes summieren die Tagesniederschläge, die mit einem Abminderungsfaktor c_i multipliziert werden. Die Abminderungsfaktoren ergeben sich aus den folgenden Gleichungen:

$$\text{VN30: } c_i = 0,9^i$$

$$\text{VN21: } c_i = (0,796 * \exp(0,0047 * \text{WZ}))^i$$

mit i = i -ter Vortag und WZ = hydrologische Wochenzahl.

Ergebnisse und Diskussion

Abbildung 31 und Abbildung 32 zeigen die beiden Vorregenindizes VN21 und VN30 für die Starkregenperioden Mai/Juni 2016. Während dieser Zeit kam es in Simbach zu verheerenden Sturzfluten und starker Erosion. Ein Faktor, der zu den katastrophalen Auswirkungen beigetragen hat, war die bereits erhöhte Vorfeuchte des Bodens im Vorfeld der extremen Stundenwerte. Beide Indizes zeigen in der Region Simbach extrem hohe Werte an. Die Vorregenindizes wurden für jeden Tag der 16-jährigen Radarklimatologie berechnet.

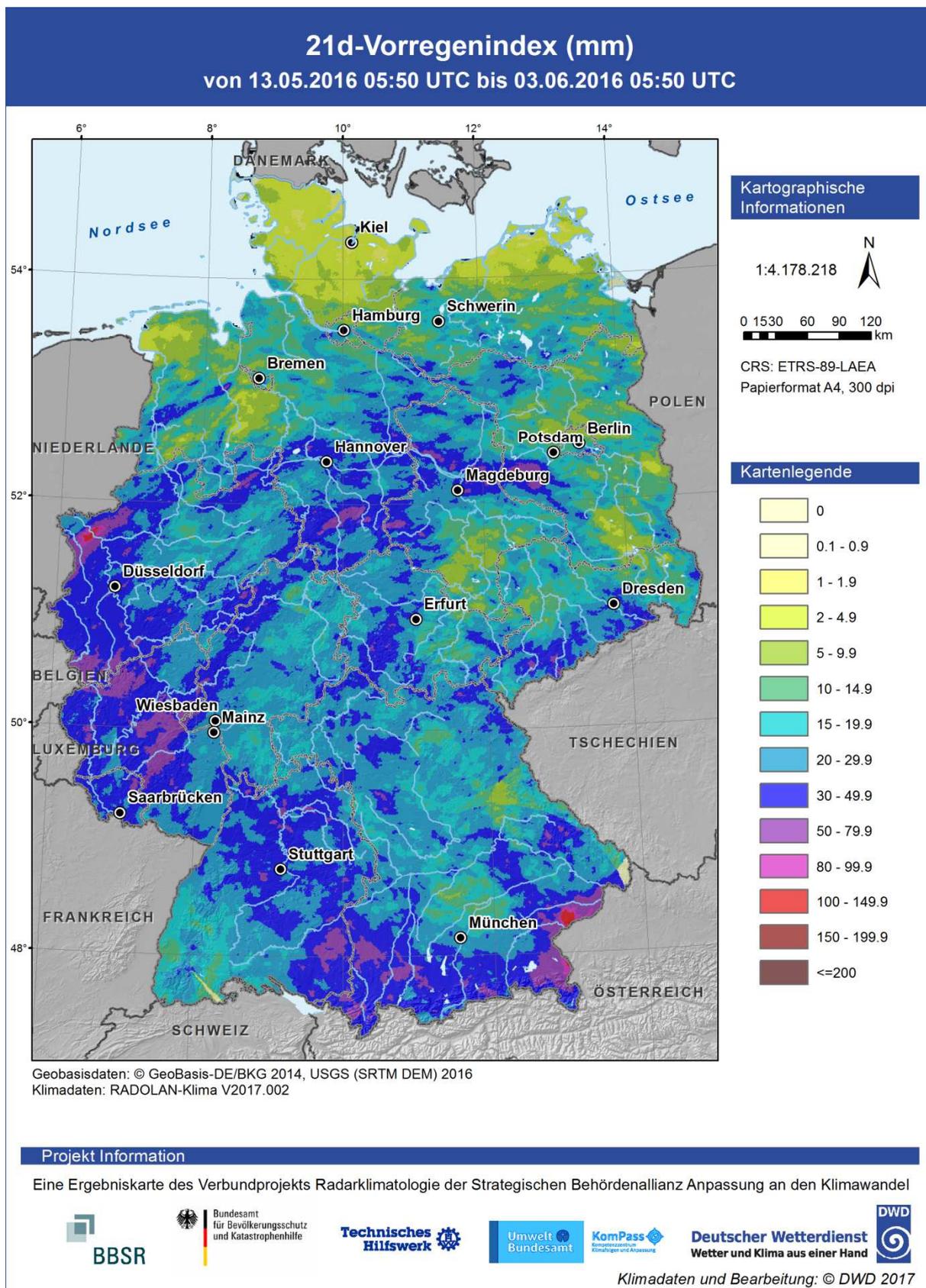


Abbildung 31: 21-Tage-Vorregenindex im Vorfeld des Simbach-Ereignisses.

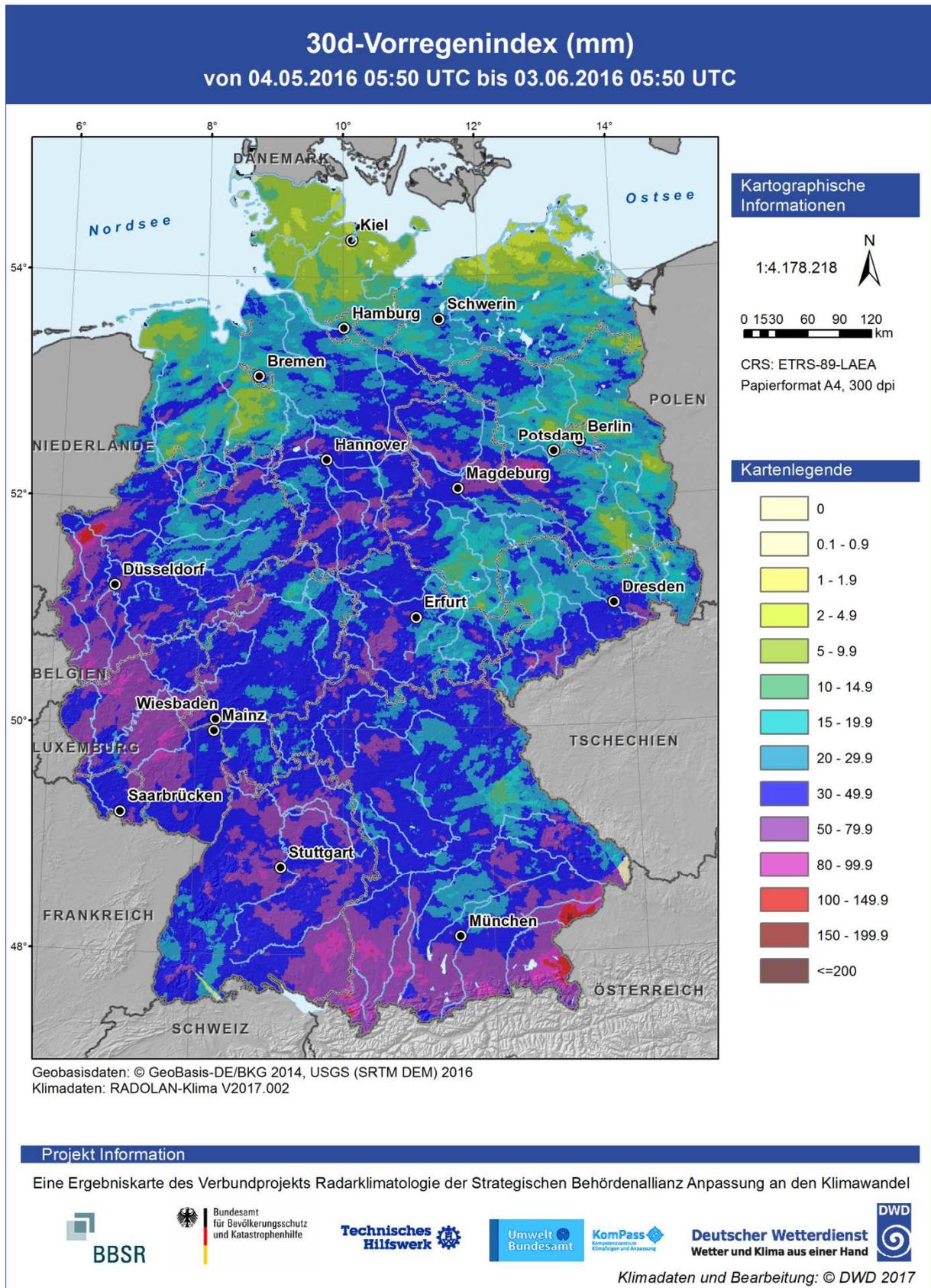


Abbildung 32: 30-Tage-Vorregenindex im Vorfeld des Simbach-Ereignisses.

7 Zusammenfassung und Fazit

Im Rahmen des Projekts „Erstellung einer dekadischen radargestützten hoch-auflösenden Niederschlagsklimatologie für Deutschland zur Auswertung der rezenten Änderung des Extremverhaltens von Niederschlag“ erfolgte eine Reprozessierung der radarbasierten Niederschlagsmessungen für Deutschland für den Zeitraum 2001 bis 2016. Ziel des Projekts war die Erstellung einer Niederschlagsklimatologie mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung, die alle – auch kleinräumige – Niederschlagsereignisse dokumentiert und somit zum ersten Mal eine Grundlage für die Analyse extremer Niederschläge in Deutschland liefert. Die Arbeiten umfassten weiterhin (extremwert-)statistische Auswertungen des Datensatzes, die Aufbereitung der Ergebnisse in Form von Karten sowie die Programmierung einer GIS-Schnittstelle zur Verarbeitung der Daten. Darüber hinaus war die Einbindung der Kunden ein wichtiger Baustein des Projekts. So fanden während der Projektlaufzeit zwei Nutzerworkshops statt, um bereits zu Beginn des Projekts sowie projektbegleitend die Kundenwünsche in die Planung einzubeziehen und die Ergebnisse des Projekts zu bewerben. Darüber hinaus wurden ein Flyer gedruckt, eine Projektwebseite eingerichtet sowie eine Kommunikationsplattform geschaffen.

Ausgangspunkt der Radarklimatologie war die RADOLAN-Software, die seit Juni 2005 im Deutschen Wetterdienst operationell betrieben wird, um in Echtzeit mit Bodendaten angelegte Niederschlagsanalysen für den Hochwasserschutz und das vorbeugende Hochwassermanagement zu produzieren. In einem ersten Schritt erfolgte die technische Anpassung der Software an die Anforderungen einer klimatologischen Reanalyse. Um die Effizienz des Systems zu steigern, ist eine parallele Berechnung einzelner unabhängiger Zeitscheiben notwendig. Im Rahmen des Projekts wurde daher ein Cluster aus virtuellen Linux-Servern aufgebaut, die über ein intelligentes Batchsystem ansteuerbar sind. Ergänzt wurde das System durch ein webbasiertes Monitoring. Das Cluster wird darüber hinaus zur Erstellung klimatologischer Auswertungen von Satellitendaten sowie von der IT-Abteilung für Hochlasttests neuer Rechner verwendet und hat somit einen festen Platz in der IT-Infrastruktur des Deutschen Wetterdienstes. Das System erleichtert und beschleunigt neben der radarbasierten Reanalyse auch die klimatologischen Postprozessierungsverfahren, die entweder zeitlich oder räumlich unabhängige Berechnungen erlauben. Die technische Umsetzung erlaubte die Durchführung einer ersten technischen Reanalyse auf der Basis der aktuellen operationellen Software.

Einen Schwerpunkt der Entwicklungsarbeiten im Rahmen der klimatologischen Reanalyse machten die Verfahren zur Qualitätsverbesserung aus. Radarbasierte Niederschlagsmessungen unterliegen vielen Faktoren, die die Qualität des Ergebnisses beeinflussen. Treffen die elektromagnetischen Wellen des Radars auf Objekte in der Atmosphäre, so reflektieren und streuen diese zurück zum Empfänger. Eine Unterscheidung, ob das detektierte Objekt ein Hydrometeor oder ein Störobjekt ist, ist nur eingeschränkt möglich. Mit der Installation der Doppler-Radare können unbewegliche Objekte als Störung detektiert werden. Reflektivitäten beweglicher Objekte, z. B. Vögel, Insekten oder auch Windkraftanlagen, werden vom System hingegen nicht komplett gefiltert. Diese Störpixel oder Clutter besitzen in der Regel eine sehr hohe Intensität, so dass klimatologische Auswertungen der Datensätze, insbesondere mit dem Fokus auf Extremniederschläge, beeinflusst werden. Darüber hinaus werden die Radarmessungen durch Hindernisse beeinträchtigt, die die Ausbreitung der Radarstrahlen unterbinden. Die in der Folge auftretenden Segmente geringer Reflektivität (Speichen) treten oftmals erst deutlich in Erscheinung, wenn die abgeleiteten Niederschlagswerte über einen längeren Zeitraum aufsummiert werden. Ein weiterer Effekt, der erst in der klimatologischen Betrachtung deutlich wird, ist die Abnahme der Niederschlagswerte mit der Entfernung vom Radarstandort und der Zunahme der Messhöhe. Ursachen hierfür sind die Vergrößerung des Messvolumens, die Zunahme der Dämpfung entlang des Radarstrahls sowie das

„Overshooting“, also die Messung oberhalb der niederschlagsbildenden Wolken. Im Rahmen der Projektarbeiten wurden umfangreiche klimatologische Verfahren zur Korrektur der lokalen Reflektivitätsprodukte entwickelt. Durch die effektiven Filter, die Korrektur der höhenabhängigen Signalreduktion und die Auffüllung der Speichen wurde ein Niederschlagsprodukt erzeugt, das eine flächendeckend gute Qualität bietet. Im Rahmen der Radarklimatologie standen bislang nur die bodennahen Reflektivitäten der horizontalen Polarisationssebene zur Verfügung. In Zukunft erlauben die Daten der neuen Dual-Pol-Systeme eine erneut verbesserte Detektion und Korrektur von Störungen und Abschätzung der Niederschlagsmengen.

Ein wichtiger Aspekt bei der Herleitung quantitativer Niederschlagsprodukte ist die Kombination der radarbasierten Reflektivitätsmessungen mit bodengestützten direkten Niederschlagsmessungen der Stationen. Während für die Echtzeitanwendung ausschließlich automatische Messsysteme Verwendung finden, können bei der klimatologischen Auswertung alle Niederschlagsmessungen berücksichtigt werden. Dies ist insbesondere für die ersten Jahre des Zeitraums von entscheidender Bedeutung, da ein Großteil der Messungen noch nicht automatisiert war. Um die Tageswerte in die stündliche Aneicherung einzubringen, wurde ein Disaggregierungsansatz verwendet, der die Tageswerte entsprechend der relativen Verhältnisse der Radardaten in Stundenwerte zerlegt. Durch die Einbringung der zusätzlichen Daten konnte die Qualität der Reanalyse deutlich verbessert werden.

Mit der Inbetriebnahme des Radars Dresden im Frühjahr 2000 wurde der Radarverbund des Deutschen Wetterdienstes zur flächendeckenden Erfassung des Niederschlagsgeschehens in Deutschland vervollständigt. Im Rahmen der Radarklimatologie erfolgte die Datenauswertung ab dem 01.01.2001 für vollständige 16 Jahre. Die vorliegende Radarklimatologie umfasst stündliche, an Stationsdaten angeeichte Niederschlagsanalysen mit umfangreicher klimatologischer Qualitätskontrolle und zahlreiche Summenprodukte sowie fünfminütige quantifizierte Niederschlagsraten. Als abgeleitete Produkte stehen eine Abschätzung der Regenerosivität (R-Faktor der Allgemeinen Bodenabtragsgleichung) sowie zwei Vorregenzindizes zur Abschätzung der Bodenfeuchte zur Verfügung.

Auf der Basis der Niederschlagsprodukte wurden darüber hinaus statistische Untersuchungen des Auftretens extremer Niederschläge durchgeführt. Neben dem Auszählen von Schwellwertüberschreitungen wurden statistische Niederschläge mit Hilfe einer extremwertstatistischen Auswertung ermittelt. Die Ergebnisse zeigen für lange Dauerstufen und kurze Wiederkehrzeiten ein deutschlandweit sehr ähnliches Muster wie die stationsbasierten Auswertungen langer Niederschlagszeitreihen. Der Grund hierfür liegt in der eher großflächigen Struktur langanhaltender Niederschläge, die durch das umfangreiche Stationsmessnetz des Deutschen Wetterdienstes gut erfasst werden. Im Gegensatz dazu treten Niederschlagsereignisse kurzer Dauerstufen und langer Wiederkehrzeiten kleinräumig auf und werden daher vom bodengestützten Stationsmessnetz nicht immer erfasst. Hier zeigt sich ein großer Vorteil des Radars, das diese konvektiven Zellen aufgrund der flächendeckenden Messung vollständig detektiert. Auch die räumlichen Muster der statistischen Niederschläge der seltenen Ereignisse kurzer Andauer weisen große Unterschiede auf. Während die stationsbasierte Analyse auch in diesem Fall sehr stark orografiegeprägt ist, sind die Extremereignisse auf Basis der Radarklimatologie unabhängiger von den topographischen Gegebenheiten und treten praktisch im ganzen Bundesgebiet auf. Die Ergebnisse der Radarklimatologie geben somit einen Anhaltspunkt dafür, dass die Gefährdung durch extremen Starkregen in vielen Gegenden gegeben ist. Ob eine konkrete Gefährdung durch Sturzfluten oder Hochwässer besteht, ist in Kombination mit den hydrologischen Gegebenheiten der jeweiligen Regionen und Städte zu ermitteln.

Die Ergebnisse der Radarklimatologie liegen in Form von Rasterprodukten in polarstereographischer Projektion vor. Um die Anwendbarkeit der Daten zu erhöhen, wurde eine RADKLIM-Toolbox für ArcGIS und QGIS entwickelt. Die wichtigsten Werkzeuge umfassen

das korrekte Einlesen der Datenprodukte, die Transformation auf ein Standardgitter und die Erstellung von Standardkarten mit korrektem Layout. Darüber hinaus sind natürlich alle GIS-Funktionalitäten verfügbar. Das QGIS-Plugin ist darüber hinaus im Rahmen von TopDeutschland lauffähig.

Die Radarklimatologie liefert einen deutschlandweit einmaligen Datensatz des Starkregenaufkommens in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung. Die verbesserte räumliche Erfassung kurzlebiger (konvektiver) Extremniederschläge mit hohem Schadenspotenzial erlaubt Gefährdungs- und Risikoanalysen im Rahmen des Bevölkerungs- und Hochwasserschutzes und unterstützt eine „wassersensible“ Raumgestaltung in der Landschafts- und Stadtplanung im Kontext der Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel. Der Datensatz ermöglicht darüber hinaus eine Verbesserung der Erosionsüberwachung in der Landwirtschaft. Aufgrund der hohen Auflösung und flächendeckenden Erfassung der Niederschläge stellt der Datensatz eine Referenz für die Evaluierung von Klimamodellsimulationen bzgl. extremer Niederschläge dar, die bislang auf der Basis stationsgestützter Niederschlagsdaten nur eingeschränkt möglich war.

Die flächendeckende Erfassung der Starkniederschläge bietet ein großes Potenzial für weiterführende Analysen. Diese reichen von der (extremwert-)statistischen Auswertung zur Bestimmung statistischer Niederschläge bis zur Untersuchung von Trends im Auftreten von Extremereignissen. Aufgrund der Länge der Zeitreihe von bislang 16 Jahren ist die statistische Belastbarkeit der abgeleiteten Produkte derzeit noch eingeschränkt. Dies gilt insbesondere für die extrem intensiven und seltenen Ereignisse, die aufgrund ihres Schadenspotenzials von besonderem Interesse sind. Die vorliegenden extremwertstatistischen Auswertungen liefern aber schon jetzt erste Erkenntnisse über die Verteilung und Häufigkeit von Extremniederschlägen in Deutschland, die in dieser Form von den stationsbasierten Analysen nicht erkannt werden.

Im Rahmen des Projekts „Radarklimatologie“ der Strategischen Behördenallianz „Anpassung an den Klimawandel“ wurden die methodischen Grundlagen sowie die technischen Voraussetzungen geschaffen, um die Zeitreihe der Radarklimatologie jährlich zu erweitern und somit den Datenumfang und damit die statistische Belastbarkeit der Ergebnisse weiter zu erhöhen. Der Deutsche Wetterdienst wird die radarbasierte Niederschlagsklimatologie in den nächsten Jahren weiterentwickeln, die Datenbasis verlängern und im Rahmen verschiedener Anwendungen, z. B. im Bereich der Starkregengefährdungsanalyse und der Erosionsbestimmung, in Zusammenarbeit mit Behörden und Universitäten in die Anwendung bringen.

8 Literatur

Berg, P., Norn, L. & Olsson, J. (2015): Creation of a high resolution precipitation data set by merging gridded gauge data and radar observations for Sweden; Journal of Hydrology, in press, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.11.031.

Bližňák, V., Kašpar, M. & Müller, M. (2016): Radar-based precipitation climatology of the Czech Republic in the warm part of the year; EMS Annual Meeting Abstracts 13, EMS2016-262.

Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (2017): TopDeutschland – Karten im Einsatz; <https://www.bkg.bund.de/DE/Ueber-das-BKG/Geoinformation/Sonderleistungen/TopDeutschland/topdeutschland.html>.

Deutscher Wetterdienst (2004): Projekt RADOLAN – Routineverfahren zur Online-Aneicherung der Radarniederschlagsdaten mit Hilfe von automatischen Bodenniederschlagsstationen (Ombrometer); Abschlussbericht, 111 Seiten.

Deutscher Wetterdienst (2015): Arbeitspapier 1. Nutzerworkshop Radarklimatologie – Ein Projekt der Strategischen Behördenallianz „Anpassung an den Klimawandel“, 15 Seiten.

Deutscher Wetterdienst (2016a): Dokumentation 2. Nutzerworkshop Radarklimatologie – Ein Projekt der Strategischen Behördenallianz „Anpassung an den Klimawandel“, 7 Seiten.

Deutscher Wetterdienst (2016b): RADOLAN/RADVOR – Hoch aufgelöste Niederschlagsanalyse und –vorhersage auf der Basis quantitativer Radar- und Ombrometerdaten für grenzüberschreitende Fluss-Einzugsgebiete von Deutschland im Echtzeitbetrieb Beschreibung des Kompositformats, Version 2.4, 20 Seiten.

Deutscher Wetterdienst (2017a): RADKLIM ArcGIS Toolbox v1.0 – USER MANUAL, 35 Seiten.

Deutscher Wetterdienst (2017b): RADKLIM Qgis Plugin – USER MANUAL, 12 Seiten.

DWA (2012): Arbeitsblatt DWA-A 531 – Starkregen in Abhängigkeit von Wiederkehrzeit und Dauer; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., 29 Seiten.

Fairman, J. G., D. M. Shultz, D. J. Kirshbaum, S. L. Hray und A. I. Barrett (2015): A radar-based rainfall climatology of Great Britain and Ireland; Weather, 70, 5, 153–158, DOI: 10.1002/wea.2486.

Goudenhoofdt, E. und L. Delobbe (2016a): Generation and Verification of Rainfall Estimates from 10-Yr volumetric Weather Radar Measurements; Journal of Hydrometeorology 17, 1223–1242, DOI: 10.1175/JHM-D-15-0166.1.

Goudenhoofdt, E. und L. Delobbe (2016b): Extreme value analysis based on a 10-year radar-based precipitation reanalysis; EMS Annual Meeting Abstracts 13, EMS2016-677.

Gabella, M. und R. Notarpietro (2002): Ground clutter characterization and elimination in mountainous terrain; Proc. 2nd Europ. Conf. On Radar in Meteor. And Hydrol., Delft, The Netherlands, 305–311.

Geier (2009): Klimawandel und Katastrophenschutz, Vortrag zur AGBF Fachtagung 2009 in Wilhelmshaven; http://www.agbf.de/pdf/Vortrag_Klimawandel_und_Katastrophenschutz.pdf.

Hassler, B., A. Wagner, J. Seltmann und P. Lang (2005): The German Pancake – a Radar Mystery; EGU General Assembly Abstracts, no: EGU05-A-08117.

Hassler, B., K. Helmert und J. Seltmann (2006): Identification of spurious precipitation signals in radar data; Proc. 4th Europ. Conf. on Radar in Meteor. and Hydrol., Barcelona, Spain, 587–589.

Hengstebeck, T., K. Helmert und J. Seltmann (2010): RADARQS – a standard quality control software for radar data at DWD; Proc. 6th Europ. Conf. On Radar in Meteor. And Hydrol., Sibiu, Romania.

Heistermann, M., S. Jacobi und T. Pfaff (2013): Technical Note: An open source library for processing weather radar data (wradlib); Earth Syst. Sci. 17, 863–871, DOI: [10.5194/hess-17-863-2013](https://doi.org/10.5194/hess-17-863-2013).

Helmert, K. und B. Hassler (2006): Development and application of quality-index composit; Proc. 4th Europ. Conf. on Radar in Meteor. and Hydrol., Barcelona, Spain, 587–589.

IPCC (2011): Summary for Policy Makers. In: Intergovernmental Panel on Climate Change Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation [Field, C.B., et al., (eds.)]; Cambridge University Press, Cambridge, http://ipcc-wg2.gov/SREX/images/uploads/SREX-SPM_Approved-HiRes_opt.pdf.

Jacobi, S., A. Bronstert und M. Heistermann (2014): Rain rate retrieval of partially blocked beams from single-polarized weather radar data; 8th European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology (ERAD), Garmisch-Partenkirchen, Germany, September 2014.

Kaltenboeck, R. und M. Steinheimer (2015): Radar-based severe storm climatology for Austrian complex orography related to vertical wind shear and atmospheric instability; Atmospheric Research 158/159, 216–230, DOI: 10.1016/j.atmosres.2014.08.006.

Keupp, L., T. Winterrath und R. Hollmann (2016): Use of Weather Radar Data for Climate Data Records in WMO Region VI; WMO TT-URSDCM.

Koistinen, J., T. Kuitunen, S. Pulkkinen, H. Hohti und J. Kotro (2008): Derivation of extreme event mesoscale area-intensity return periods of rainfall based on a large sample of radar data; Contribution to ERAD 2008 – The Fifth European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology.

Kronenberg, R. und C. Bernhofer (2015): A method to adapt radar-derived precipitation fields for climatological applications; Meteorological Applications 22, 636–649, DOI: 10.1002/met.1498.

Marra, F. und E. Morrin (2015): Use of radar QPE for the derivation of Intensity–Duration–Frequency curves in a range of climatic regimes; *Journal of Hydrology* 531, 427–440, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.08.064.

Overeem, A., I. Holleman und A. Buishand (2009): Derivation of a 10-Year Radar-Based Climatology of Rainfall; *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 48, 1448–1463, DOI: 10.1175/2009JAMC1954.1.

Paulat, M., C. Frei, M. Hagen und H. Wernli (2008): A gridded dataset of hourly precipitation in Germany: Its construction, climatology and application; *Meteorologische Zeitschrift* 17, 6, 719–732, DOI: 10.1127/0941-2948/2008/0332.

Prat, O. P. und B. R. Nelson (2015): Evaluation of precipitation estimates over CONUS derived from satellite, radar, and rain gauge data sets at daily to annual scales (2002–2012); *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19, 2037–2056.

Rauthe, M., H. Steiner, U. Riediger, A. Mazurkiewicz und A. Gratzki (2013): A Central European precipitation climatology – Part I: Generation and validation of a high-resolution gridded daily data set (HYRAS); Vol. 22(3), p 235–256, DOI:10.1127/0941-2948/2013/0436.

Richter, D. (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zu Korrektur des systematischen Meßfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers; *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* 194, im Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach.

Rudolph, J. V., K. Friedrich und U. Germann (2009): A Radar-based Climatology of High Precipitation Events in the European Alps: 2000–2007; Contribution to the Conference on Mesoscale Meteorology, American Meteorological Society, August 2009, Salt Lake City, USA.

Seres, A. T. und Á. Horváth (2015): Thunderstorm climatology in Hungary using doppler radar data; *Időjárás – Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service* 119, 2, 185–196.

Strotmann, V. (2011): Anpassung an extremere Wetterereignisse im Klima von morgen; Rede zur Pressekonferenz des Deutschen Wetterdienstes zu „Anpassung an extremere Wetterereignisse im Klima von morgen“, 15. Februar 2011.

Tabary, P., P. Dupuy, G. L'Henaff, C. Gueguen, L. Moulin, O. Laurantin, C. Merlier und J.-M. Soubeyrou (2012): A 10-year (1997–2006) reanalysis of Quantitative Precipitation Estimation over France: methodology and first results; *Weather Radar and Hydrology* (Proceedings of a symposium held in Exeter, UK, April 2011). IAHS Publication 351, 255–260. (Abstract)

Thorndahl, S., J. E. Nielsen und M. R. Rasmussen (2014): Bias adjustment and advection interpolation of long-term high resolution radar rainfall series; *Journal of Hydrology* 508, 214–226, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.10.056.

Wagner, A., J. Seltmann und H. Kunstmann (2014): The German radar composite RX: Qualitative performance analysis for a precipitation climatology; Contribution to ERAD 2014 – The Eighth European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology.

Zaiß, H. (1989): Simulation ereignisspezifischer Einflüsse des Niederschlag-Abfluß-Prozesses von Hochwasserereignissen kleiner Einzugsgebiete mit Niederschlag-Abfluß-Modellen; Technische Berichte über Ingenieurhydrologie und Hydraulik, Institut für Wasserbau, Technische Hochschule Darmstadt, Nr. 42.

9 Im Berichtszeitraum vom Projektnehmer realisierte Veröffentlichungen zum Projekt

Vorträge (chronologisch):

Winterrath, T., S. Krings: Erstellung einer radargestützten Niederschlagsklimatologie – ein Projekt der strategischen Behördenallianz; Vortrag auf dem Konvektionsworkshop der TLUG; Jena; Juni 2014.

Junghänel, T., T. Winterrath, A. Schmitt, M. Hafer, E. Weigl, A. Becker: Bewertung und Management des Starkregenrisikos mit Hilfe der DWD Wetterradare; Vortrag auf dem 14. Forum Katastrophenvorsorge; Leipzig; November 2014.

Schmitt, A., T. Winterrath, T. Junghänel, M. Hafer, E. Weigl, A. Becker: The German Radar Precipitation Climatology and its Application Possibilities; Vortrag auf der RainGain Final Conference, Mame-la-Vallée (Frankreich); Juni 2015.

Junghänel, T., Brendel, C., Winterrath, T., Schmitt, A., Hafer, M., Weigl, E., Becker, A.: Towards a radar-based precipitation climatology for Germany – first results and future perspectives; extended abstract für die 37th Conference on Radar Meteorology, Norman, Oklahoma, USA; September 2015.

Schmitt, A., T. Winterrath, C. Brendel, T. Junghänel, M. Hafer, E. Weigl, A. Becker: The German radar precipitation climatology and its fields of application in urbanized areas and urban flood risk mapping; Vortrag auf dem 10th International Workshop on Precipitation in Urban Areas; Pontresina (Schweiz); Dezember 2015.

Winterrath, T., T. Junghänel, C. Brendel, A. Schmitt, E. Weigl, M. Hafer: Bemessungswesen und Risikomanagement von Starkregen im urbanen Raum im Kontext des Klimawandels; Vortrag auf dem 13. Hochwasserschutzforum in der Metropolregion Rhein-Neckar; Mannheim; Dezember 2015.

Brendel, C., T. Junghänel, T. Winterrath, A. Schmitt, M. Hafer, E. Weigl, A. Becker: Entwicklung einer radargestützten Niederschlagsklimatologie für Deutschland; Vortrag auf der DACH; Berlin, März 2016.

Winterrath, T., T. Junghänel, C. Brendel, A. Schmitt, E. Walawender, J. Schiller, E. Weigl, M. Hafer, A. Becker: Hochaufgelöste Niederschlagsklimatologie für Deutschland zur nutzerspezifischen Analyse von Extremereignissen; Vortrag auf den 10. Annaberger Klimatagen; Annaberg; Mai 2016.

Winterrath, T., T. Junghänel, E. Walawender, C. Brendel, A. Schmitt, J. Schiller, M. Hafer, E. Weigl, A. Becker: Towards a radar-based high-resolution precipitation climatology for Germany – methodology and potential areas of application; Vortrag auf der EMS-Konferenz; Triest (Italien); September 2016.

Winterrath, T., T. Junghänel, C. Brendel, E. Weigl, M. Hafer, A. Becker: Starkregen im Kontext des Klimawandels – was sagen uns Messungen und Klimaprojektionen?; Vortrag auf der Fachkonferenz „Hochwasserschutz in Hessen“, Melsungen; November 2016.

Poster (chronologisch):

Weigl, E., T. Winterrath: Radar-Based Precipitation Climatology for Germany – First Results and Future Directions; Poster auf der 8th European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology; Garmisch-Partenkirchen; September 2014.

Brendel, C., T. Junghänel, T. Winterrath, A. Schmitt, M. Hafer, E. Weigl, A. Becker: Towards a Radar-Based Precipitation Climatology for Germany – The Importance of Surface Precipitation Observation; Poster auf dem 10th International Workshop on Precipitation in Urban Areas; Pontresina (Schweiz); Dezember 2015.

Walawender, E., T. Winterrath, C. Brendel, M. Hafer, T. Junghänel, A. Klameth, E. Weigl und A. Becker: Radar climatology for Germany – a 16-year high resolution precipitation data and its possibilities; Poster auf der EGU General Assembly, Wien, April 2017.

Textpublikationen:

Winterrath, T. (2016): Bemessungswesen und Risikomanagement von Starkregen im urbanen Raum im Kontext des Klimawandels; In: 13. Hochwasserschutzforum in der Metropolregion Rhein-Neckar, Schriftenreihe des Verbandes Region Rhein-Neckar, Heft 15, S. 1-9.

Winterrath, T. (2016): Hochaufgelöste Niederschlagsklimatologie für Deutschland zur nutzerspezifischen Analyse von Extremereignissen; In: Annalen der Meteorologie, Band 49, S. 43-46; <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:101:1-201609271148>.

Webpublikationen:

Winterrath, T. (2016) Dampf im Kessel; In: der gemeinderat; <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:101:1-201609271148>.

Projektwebseite mit Informationen zum Projekt unter: <ftp://ftp.dwd.de/pub/data/gpcc/radarklimatologie/index.html>.

Forum mit Informationen zum Projekt und interaktiver Diskussionsplattform unter: <https://www.bscw.bund.de/>.

Pressemitteilungen:

Starkregenrisiko in Städten kann jetzt besser eingeschätzt werden; **Klima-Presskonferenz 2016 des Deutschen Wetterdienstes**; März 2016 unter: http://www.dwd.de/DE/presse/pressekonferenzen/DE/2016/PK_08_03_2016/pressekonferenz.html.

Abschlussbericht

Dr. Tanja Winterrath
Deutscher Wetterdienst
Geschäftsbereich Klima und Umwelt
Abteilung Hydrometeorologie

August 2017

<http://www.dwd.de/radarklimatologie>
<ftp://ftp.dwd.de/pub/data/gpcc/radarklimatologie/index.html>