

TEXTE

69/2019

Regionalisierung stündlicher Niederschläge zur Modellierung der nassen Deposition 2

Abschlussbericht

TEXTE 69/2019

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3715 53 200 0
UBA-FB 002656

Regionalisierung stündlicher Niederschläge zur Modellierung der nassen Deposition 2

Abschlussbericht

von

Prof. Dr.-Ing. Uwe Haberlandt (Projektleitung),
Dr.-Ing. Christian Berndt (Bearbeitung)
Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Leibniz Universität Hannover

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber:

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt

Durchführung der Studie:

Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft
Leibniz Universität Hannover
Appelstraße 9A
30167 Hannover

Abschlussdatum:

Dezember 2017

Redaktion:

Fachgebiet II 4.1 Grundsatzfragen der Luftreinhaltung
Stephan Nordmann

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Juli 2019

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung

Das Forschungsprojekt „Regionalisierung stündlicher Niederschläge zur Modellierung der nassen Deposition“ (RESTNI II) hat die Zielsetzung flächenmäßige Niederschlagsdaten für die Berücksichtigung der nassen Deposition bei der Ausbreitungsrechnung von Luftschadstoffen auf einem 1 km x 1 km Raster und für einen zehnjährigen Zeitraum (2006 bis 2015) bereitzustellen. In einem Vorgängerprojekt (RESTNI) wurden unterschiedliche räumliche Interpolationsmethoden für Stationsniederschläge für die Pilotregion Niedersachsen getestet und validiert. Die Methode Multi-Step Ordinary Kriging in Kombination mit einer Skalierung der Niederschlagsdaten auf eine vorgegebene Jahressumme lieferte das beste Ergebnis und wird hier für die Erstellung des Datensatzes verwendet. Multi-Step Ordinary Kriging besteht aus einer geostatistischen Interpolation der Niederschlagshöhe mit einer vorgeschalteten Indikatorinterpolation des Niederschlagsvorkommens und erlaubt eine scharfe Trennung zwischen Trocken- und Nassphasen. Im Anschluss an die Interpolation erfolgt eine monatsweise Skalierung unter Verwendung des REGNIE-Datensatzes des Deutschen Wetterdienstes, wodurch eine Übereinstimmung der Jahressumme des Niederschlags sichergestellt wird. Des Weiteren wird durch eine Überprüfung des Interpolationsfehlers für das Gesamtgebiet Deutschlands sichergestellt, dass die Interpolationsmethode für Regionen mit unterschiedlichen naturräumlichen Gegebenheiten eine ausreichende Genauigkeit aufweist. Die Plausibilität des erstellten Datensatzes wird durch den Vergleich ausgewählter ausgelesener Zeitreihen mit den entsprechenden Stationswerten, sowie durch die Erstellung jährlicher Karten der Jahressumme und der Anzahl der Regenstunden überprüft. Das Auslesen der Daten für ein beliebiges Jahr und einen beliebigen Standort erfolgt mit einem R-Skript.

Abstract

The objective of the research project RESTNI II (Regionalisation of hourly rainfall for the modelling of wet deposition) is the generation of nation-wide rainfall data for Germany on a 1 km x 1 km grid for a time period of ten years (2006 to 2015) in order to consider the process of wet deposition in the simulation of atmospheric pollutant dispersion. Different spatial interpolation techniques were tested and validated for the pilot region Lower Saxony in a previous project. The approach Multi-Step Ordinary Kriging with a scaling of rainfall values to a predefined annual sum delivered the best result and is adopted here for the generation of nation-wide data. It consists of a geostatistical interpolation of rainfall amount with a preceding indicator interpolation of rainfall occurrence. Next, the rainfall amounts are scaled to monthly sums obtained from the REGNIE dataset provided by the German Weather Service. An evaluation of the interpolation error for the entire country is performed in order to check whether the spatial interpolation is accurate enough for different regions of Germany. The general data plausibility is examined by extracting selected time series and comparing them to the corresponding rain gauge observations. Moreover, annual maps of rainfall sum and number of rainy hours are created. An R-script is provided that can be used for extracting rainfall data for any specified year and location.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	8
Tabellenverzeichnis.....	10
Abkürzungsverzeichnis.....	11
Zusammenfassung.....	12
Summary	16
1 Einleitung.....	20
1.1 Problem und Zielstellung.....	20
1.2 Vorgängerprojekt: Pilotstudie für Niedersachsen	20
1.3 Vorgehensweise zur Bereitstellung deutschlandweiter Niederschlagsdaten	21
2 Interpolationsmethodik.....	23
2.1 Variographie	23
2.2 Multi-Step Ordinary Kriging.....	24
2.3 Bewertung der Interpolationsgüte	26
2.4 Niederschlagsskalierung	26
3 Datenaufbereitung	27
3.1 Datenbeschaffung für das Interpolationsgebiet.....	27
3.2 Aufbereitung und Prüfung der Stationsdaten	28
3.3 Aufbereitung der REGNIE-Daten	29
4 Ergebnisse der Interpolation	30
4.1 Überprüfung der Interpolationsmethodik für Gesamtdeutschland	30
4.2 Variogrammerstellung für das Interpolationsgebiet	31
4.3 Kartierung des jährlichen Kreuzvalidierungsfehlers.....	33
4.4 Skalierung auf REGNIE-Monatswerte	35
5 Plausibilitätsprüfung.....	36
5.1 Korrelation mit Beobachtungsdaten	36
5.2 Jahresniederschlag	37
6 Bereitstellung der Daten	39
6.1 Datenformat und technische Voraussetzungen	39
6.2 Anleitung zum Auslesen einer Zeitreihe.....	40
7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	41
8 Quellenverzeichnis	42
9 Anhang.....	43
9.1 Ergebnisse der Doppelsummenanalyse.....	43

9.2	Räumliche Karten des Interpolationsfehlers	43
9.3	Korrelation ausgelesener Niederschlagszeitreihen mit Beobachtungsdaten	46
9.4	Räumliche Karten der Jahressumme	47
9.5	Räumliche Karten der Anzahl der Regentage	49

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Zeitlicher Verlauf der vorhandenen stündlichen Stationsmessungen (links) und Standorte der Niederschlagsstationen innerhalb Deutschlands (rechts).....	27
Abbildung 2:	Ergebnisse der Ausreißerbestimmung mit REGNIE-Tageswerten	28
Abbildung 3:	Beispiel der Interpolation mit MS-OK für Gesamtdeutschland für den 3.1.2015 19:00 (oben) und den 4.8.2015 17:00 (unten). Die Farbskala liefert die Niederschlagshöhe [mm] in den Unterabbildungen für OK und MS-OK, während die dunkelblau markierten Flächen die nassen Bereiche aus dem IK markieren.	30
Abbildung 4:	Mittleres Variogramm der Niederschlagshöhe (links) und des Niederschlagsindikators (rechts)	32
Abbildung 5:	Mittleres Variogramm des Kreuzvalidierungsfehlers	32
Abbildung 6:	Karten des Gesamtfehlers und jeweils des Fehlers der Jahre 2006 bis 2008.....	34
Abbildung 7:	Abweichung der Jahressumme des Niederschlags, hervorgerufen durch die Skalierung mit anschließender Rundung auf eine Nachkommastelle.....	35
Abbildung 8:	Vergleich ausgelesener Zeitreihen mit korrespondierenden Stationsbeobachtungen für Hamburg im Jahre 2008 (oben links), Hamburg im Jahr 2013 (oben rechts), Rosenheim im Jahr 2008 (unten links) und Rosenheim im Jahr 2013 (unten rechts).....	36
Abbildung 9:	Niederschlagssumme des finalen Datenprodukts für das Jahr 2014 (links) und für das Jahr 2015 (rechts)	37
Abbildung 10:	Anzahl der Regenstunden für das Jahr 2014 (links) und das Jahr 2015 (rechts).....	38
Abbildung 11:	Ausgewählte Ergebnisse der Doppelsummenanalyse: Auf der x-Achse ist die kumulierte Referenzzeitreihe und auf der y-Achse die kumulierte Testzeitreihe aufgetragen (schwarz). Die grüne Diagonale repräsentiert den optimalen Fall.....	43
Abbildung 12:	Räumliche Verteilung des RMSE-Interpolationsfehlers (Gl. 14) für die Jahre 2009 (oben links), 2010 (oben rechts), 2011 (unten links) und 2012 unten (rechts).....	44
Abbildung 13:	Räumliche Verteilung des Interpolationsfehlers für die Jahre 2013 (oben links), 2014 (oben rechts) und 2015 (unten links).....	45
Abbildung 14:	Räumliche Verteilung der Jahressumme des finalen Datenprodukts für die Jahre 2006 (oben links), 2007 (oben rechts), 2008 (unten links), und 2009 (unten rechts).....	47

- Abbildung 15: Räumliche Verteilung der Jahressumme des finalen Datenprodukts für die Jahre 2010 (oben links), 2011 (oben rechts), 2012 (unten links), und 2013 (unten rechts).....47
- Abbildung 16: Räumliche Verteilung der Anzahl der Regentage des finalen Datenprodukts für die Jahre 2006 (oben links), 2007 (oben rechts), 2008 (unten links), und 2009 (unten rechts).....49
- Abbildung 17: Räumliche Verteilung der Anzahl der Regentage des finalen Datenprodukts für die Jahre 2010 (oben links), 2011 (oben rechts), 2012 (unten links), und 2013 (unten rechts).....49

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1:	Parameter des exponentiellen Variogrammmodells	32
Tabelle 6-1:	Überblick über die in der netCDF-Datei gespeicherten Variablen mit zugehörigen Dimensionen	39
Tabelle 6-2:	Angabe des Koordinatensystems beim Auslesen der Niederschlagszeitreihen	40
Tabelle 9-1:	Korrelation ausgelesener Zeitreihen des Niederschlags mit entsprechenden Beobachtungsdaten	46

Abkürzungsverzeichnis

AKS	Ausbreitungsklassenstatistik
AKTerm	Ausbreitungsklassenzeitreihe
DGM	Digitales Geländemodell
DWD	Deutscher Wetterdienst
EDK	External Drift Kriging
IK	Indikator Kriging
InvD	Inverse-Distanz Verfahren
MS-OK	Multi-Step Ordinary Kriging
MS-EDK	Multi-Step External Drift Kriging
NN	Nächster Nachbar Verfahren
OK	Ordinary Kriging
REGNIE	Regionalisierte Niederschläge (Datenprodukt des Deutschen Wetterdienstes)
RESTNI	Regionalisierung stündlicher Niederschläge zur Modellierung der nassen Deposition
RMSE	Root Mean Square Error

Zusammenfassung

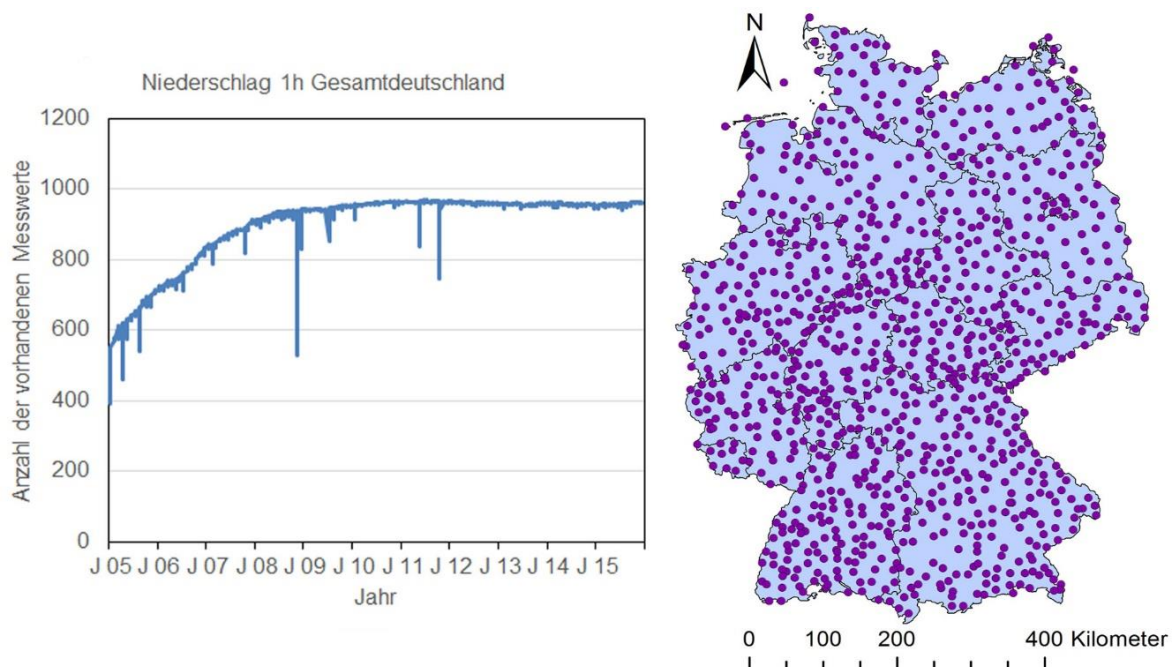
Einführung

Bei der in Deutschland nach TA Luft für die Errichtung genehmigungsbedürftiger Anlagen erforderlichen Immissionsprognose wird in der Regel auf die Berücksichtigung der durch Niederschlag ausgelösten nassen Deposition verzichtet. Aufgrund nicht vorhandener zeitlich und räumlich hoch aufgelösten Niederschlagsdaten erfolgt die Berechnung der Schadstoffeinträge lediglich unter Berücksichtigung von Windgeschwindigkeit, Windrichtung und atmosphärischer Stabilität. Das Forschungsprojekt „Regionalisierung stündlicher Niederschläge zur Modellierung der nassen Deposition 2“ (RESTNI 2) zielt auf die Bereitstellung stündlicher Niederschlagsdaten für die Ausbreitungsrechnung von Luftschadstoffen ab. In einem Vorgängerprojekt wurde ein einheitliches und transparentes Verfahren zur Bereitstellung flächendeckender Niederschlagsdaten ermittelt und validiert. Hier erfolgt die Anwendung des Verfahrens um einen deutschlandweiten Niederschlagsdatensatz mit einer Rasterauflösung von 1 km x 1 km zu erstellen.

Datenbasis und -aufbereitung

Im ersten Schritt des Projektes erfolgte die Beschaffung der Eingangsdaten. Es liegen stündliche Beobachtungen von ca. 1000 Regenschreibern in ganz Deutschland vor, welche vor der Interpolation auf Zeitreihenkonsistenz, -homogenität und Ausreißer überprüft wurden. Abbildung zeigt links die Anzahl der verfügbaren Stationsmesswerte im zeitlichen Verlauf und rechts die Lage der Messstationen innerhalb Deutschlands.

Abbildung I: Zeitlicher Verlauf der vorhandenen stündlichen Stationsmessungen (links) und Standorte der Niederschlagsstationen innerhalb Deutschlands (rechts).



Quelle: Eigene Darstellung, Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft

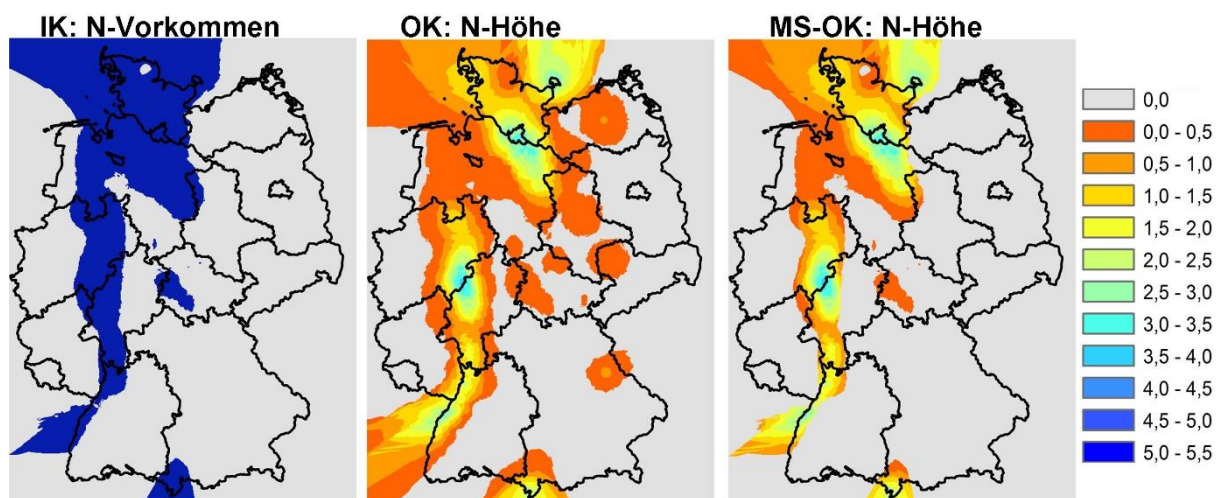
Fehlende Messungen bzw. Zeitreihenlücken wurden mit Fehlwertkennungen aufgefüllt. Eine Ausreißeridentifizierung erfolgte durch einen Vergleich mit dem Rasterprodukt REGNIE auf Tageswertbasis des Deutschen Wetterdienstes, d. h. die stündlichen Regenschreiberzeitreihen

wurden zu Tageswerten aggregiert und mit den REGNIE-Zeitreihen der entsprechenden Rasterzelle verglichen. Bei einer deutlichen Über- bzw. Unterschreitung wird der entsprechende Tag als Ausreißer markiert und durch Fehlwerte ersetzt. Die Überprüfung der Zeitreihenhomogenität erfolgte mit einer Doppelsummenanalyse, wobei für jede Station der Mittelwert der 30 nächstgelegenen Stationen als Referenzzeitreihe verwendet wurde.

Erstellung des Datensatzes durch räumliche Interpolation

Die geostatistische Interpolation mit Multi-Step Ordinary Kriging (MS-OK) benötigt Informationen über den räumlichen Zusammenhang der Variable als Eingangsinformation. Die räumliche Persistenz der Niederschlagshöhe sowie des Niederschlagsvorkommens wurde durch die Berechnung von Variogrammen durchgeführt, an die im Anschluss ein theoretisches Variogrammmodell angepasst wurde. Das stündliche Niederschlagsvorkommen (Indikatorvariable: 0 = trocken, 1 = nass) wurde mit Indikatorkriging interpoliert. Die Interpolation der stündlichen Niederschlagshöhe erfolgte dann im Anschluss nur für nasse Zellen mit Ordinary Kriging (OK), während trockene Zellen zu 0,00 mm gesetzt werden (MS-OK). Abbildung zeigt beispielhaft die Interpolation eines einstündigen Zeitschritts.

Abbildung II: Beispiel der Interpolation mit MS-OK für Gesamtdeutschland für den 4.8.2015 17:00. Die Farbskala liefert die Niederschlagshöhe [mm] in den Unterabbildungen für OK und MS-OK, während die dunkelblau markierten Flächen die nassen Bereiche aus dem IK markieren.



Quelle: Eigene Darstellung, Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft

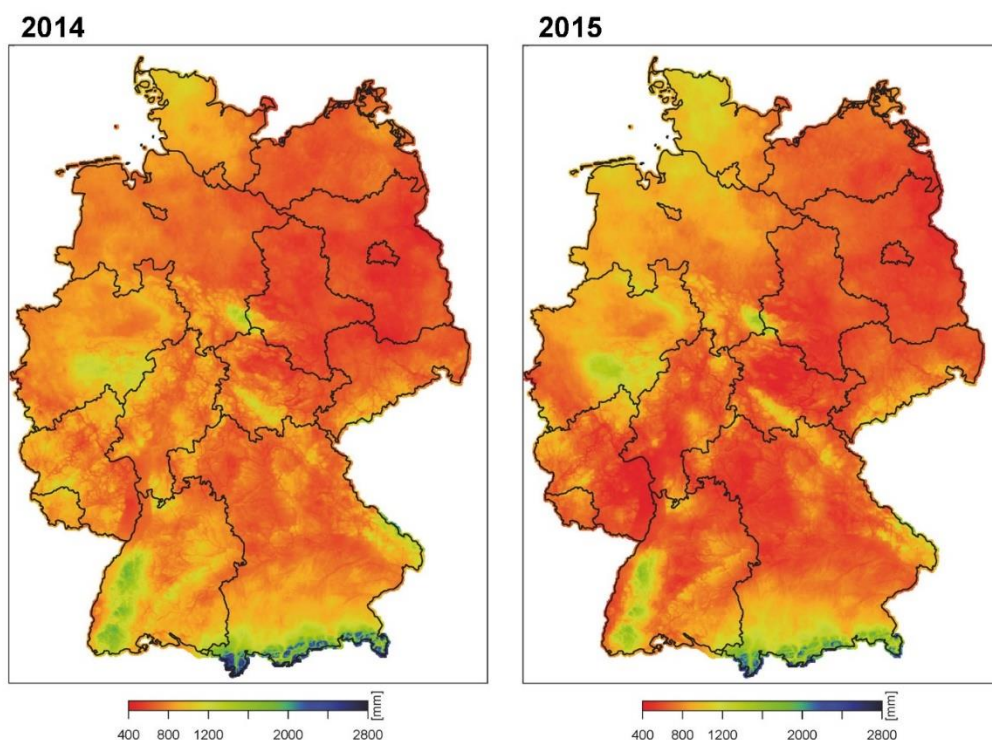
Diese Vorgehensweise erlaubt eine scharfe Abtrennung von trockenen und nassen Bereichen bzw. Zeiträumen. Zusätzlich zur eigentlichen Interpolation erfolgte eine deutschlandweite Kreuzvalidierung. Für jeden Stationsstandort wurde jahresweise ein gemitteltetes Gütekriterium berechnet, welches im Anschluss räumlich interpoliert wird. Die Ergebnisse zeigen, dass der Interpolationsfehler deutlich in Raum und Zeit variiert, allerdings nicht an die Gegebenheiten der einzelnen Naturräume Deutschlands geknüpft ist. Es ist im Allgemeinen von einer ähnlichen Interpolationsgüte im Vergleich zur Pilotregion Niedersachsen auszugehen. Im Anschluss an die geostatistische Interpolation erfolgte eine monatsweise Skalierung der Niederschlagsdaten mit dem nach Richter (1995) korrigierten REGNIE-Monatsdatensatz des Deutschen Wetterdienstes.

Die Jahressumme der skalierten Daten entspricht somit bis auf minimale Abweichungen, welche durch die Rundung der Werte auf eine Nachkommastelle entstehen, den REGNIE-Jahreswerten.

Plausibilität des Datenprodukts

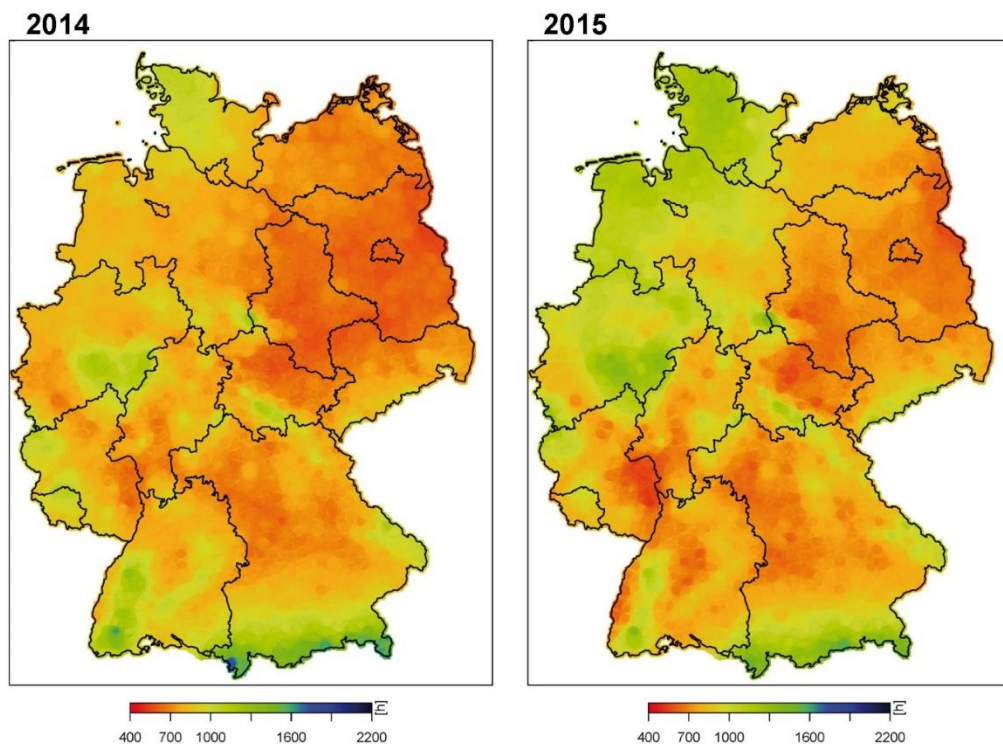
Die generelle Plausibilität der Daten wurde durch einen Vergleich von ausgelesenen Zeitreihen mit den entsprechenden Stationsbeobachtungen geprüft und zusätzlich wurde für jedes Jahr jeweils eine Karte mit der Jahressumme des Niederschlags und der Anzahl der Regenstunden erstellt, welche in Abbildung I und Abbildung II jeweils für die Jahre 2014 und 2015 dargestellt sind. Beide Karten zeigen eine plausible räumliche Verteilung und es ist ersichtlich, dass für jeden Ort in Deutschland Niederschlagswerte verfügbar sind.

Abbildung III: Niederschlagssumme des finalen Datenprodukts für das Jahr 2014 (links) und für das Jahr 2015 (rechts)



Quelle: Eigene Darstellung, Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft

Abbildung IV: Anzahl der Regenstunden für das Jahr 2014 (links) und das Jahr 2015 (rechts)



Quelle: Eigene Darstellung, Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft

Datenbereitstellung

Das Auslesen der Niederschlagszeitreihen kann mit einem Skript durchgeführt werden, welches in der Programmiersprache R geschrieben wurde und zusammen mit dem Datensatz bereitgestellt wird. Es kann eine Koordinatenangabe mit Längen- und Breitengrad oder auch die Angabe des Rechts- und Hochwertes einer entsprechenden Projektion erfolgen und das gewählte Jahr wird in einem AUSTAL2000N kompatiblen Datenformat ausgegeben. Es kann zusätzlich noch die Option gewählt werden, die Niederschlagszeitreihe auf die mittlere Jahressumme des entsprechenden Rasterpunkts zu skalieren. Das im Rahmen dieses Projektes erstellte Datenprodukt erlaubt somit für jeden Punkt Deutschlands eine Bereitstellung von Niederschlagszeitreihen, welche für die Ausbreitungsrechnung mit Berücksichtigung der nassen Deposition verwendet werden können.

Summary

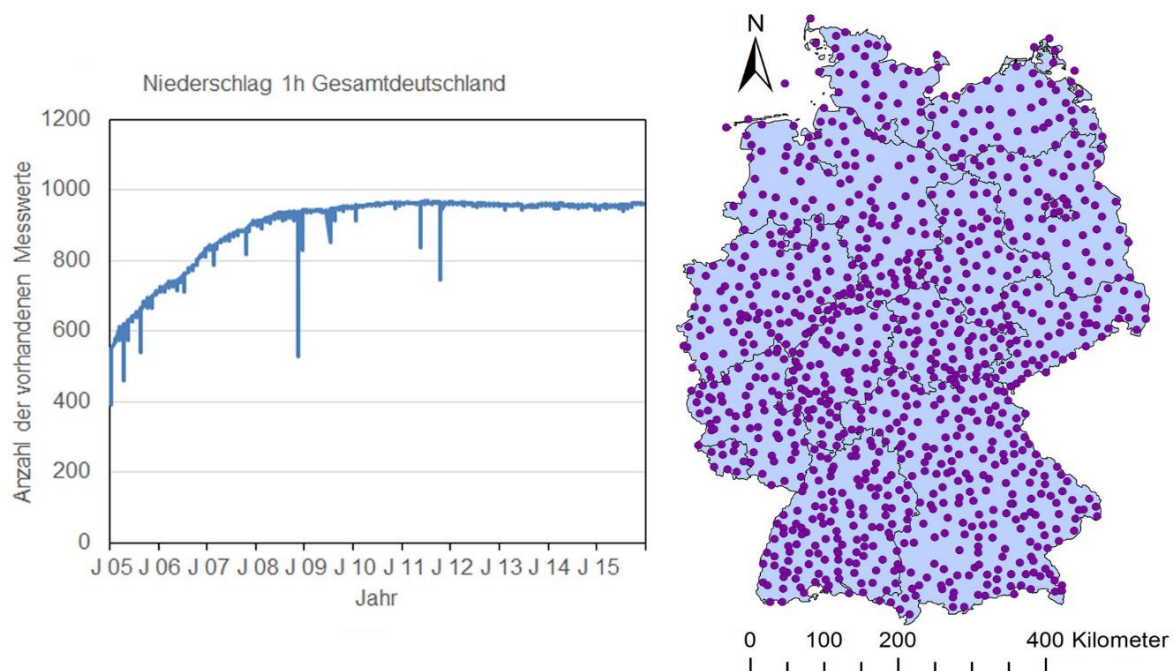
Background

In Germany, an air quality projection is required for the operation of installations which are required to hold a permit. Usually the process of wet deposition, triggered by precipitation, is not taken into account for the simulation of pollutant dispersion in the atmosphere required for this. Due to the fact that nationwide precipitation data with a high resolution in space and time are not available, the simulations are carried out using only wind velocity, wind direction and a measure of the atmospheric stability. The research project RESTNI (Regionalisation of hourly rainfall for the modelling of wet deposition) aims at providing hourly precipitation data for dispersion modelling of air pollutants. A nationwide consistent and transparent method was developed in a previous project for the pilot region Lower Saxony. Here, this method is adopted for the generation of Germany-wide hourly rainfall data for the time period from 2006 to 2015 with a spatial resolution of 1 km x 1km.

Data and corresponding processing

The first step of the project was the acquisition of meteorological observations. The German Weather service operates approximately 1000 recording rain gauges in Germany, which are displayed in Figure I.

Figure I: Temporal data availability (left) and rain gauge locations within Germany (right)



Quelle: Eigene Darstellung, Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft

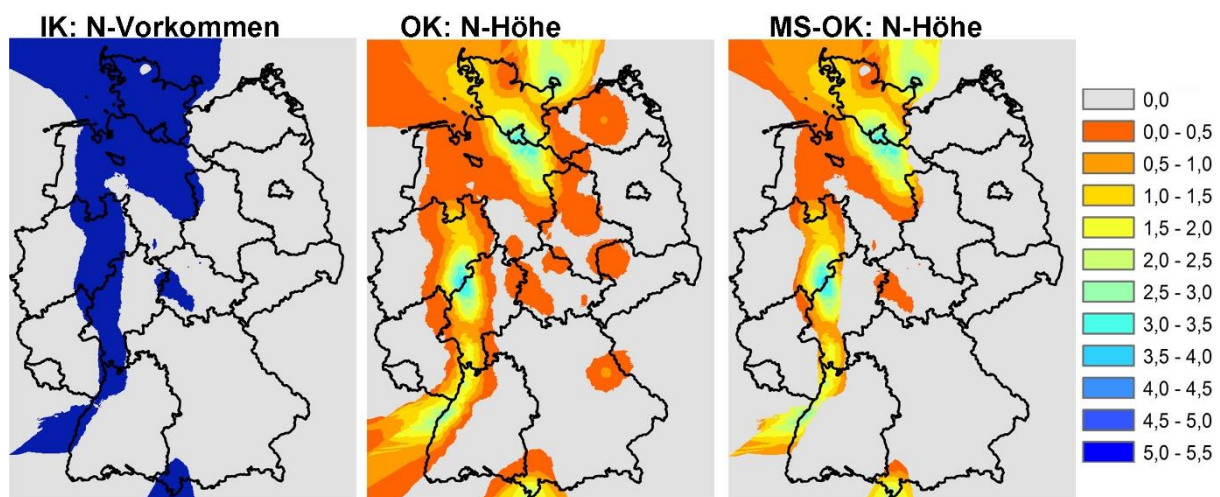
All recorded time series had to be checked for inconsistencies, homogeneity as well as outliers. Gaps with no data were filled with a specific label that indicate the non-availability of the respective recordings. An identification of outliers was performed by a comparison on a daily time scale with the gridded rainfall data set REGNIE provided by the German Weather Service, i.e. the hourly observations were aggregated to daily rainfall sums and compared with the corresponding daily rainfall value from the REGNIE pixel, wherein the station is located. In case of a significant deviation, the entire day of the station is labelled as missing and not taken into account for

the generation of this data set. The homogeneity of rainfall time series was evaluated by double sum analysis. For each station, the mean value of the 30 closest neighbouring station was used as the reference.

Generation of rainfall data by spatial interpolation

Any geostatistical interpolation requires information about the spatial behaviour of the regarded variable. The spatial persistence of rainfall amount as well as rainfall occurrence was quantified by the calculation of empirical semivariograms with a subsequent fitting of a theoretical model. The hourly rainfall occurrence (indicator variable: 0 = dry, 1 = wet) was interpolated using Indicator Kriging, while the hourly rainfall amount was interpolated using Ordinary Kriging only for wet grid cells. Dry areas were set to 0.00 mm. This procedure allows a sharp separation between wet and dry areas and time steps, respectively. Figure II illustrates the procedure of Multi-Step Ordinary Kriging. Moreover, a cross validation analysis of interpolation performance was carried out for the entire country. At each rain gauge location an annual performance criterion was computed and interpolated in space. The results show a significant variation of the interpolation error in time and space. However, the error is not linked to the different natural regions of Germany and it can be assumed that the error is not systematically higher in other regions compared to the pilot region of Lower Saxony. After that, a linear scaling of interpolated data was performed by month, i.e. the interpolated rainfall is adjusted to monthly rainfall values of the REGNIE data set. This implies that also the annual rainfall sum of the resulting data product is identical to the annual sum of REGNIE data. Only minimal deviations due to rounding to one decimal place might occur.

Figure II: Interpolation using MS-OK for entire Germany (time step: 4.8.2015 17:00). The colourbar indicates the rainfall amount in the middle and the right panel (OK and MS-OK), while the blue area in the left panel indicates the wet domain from IK.

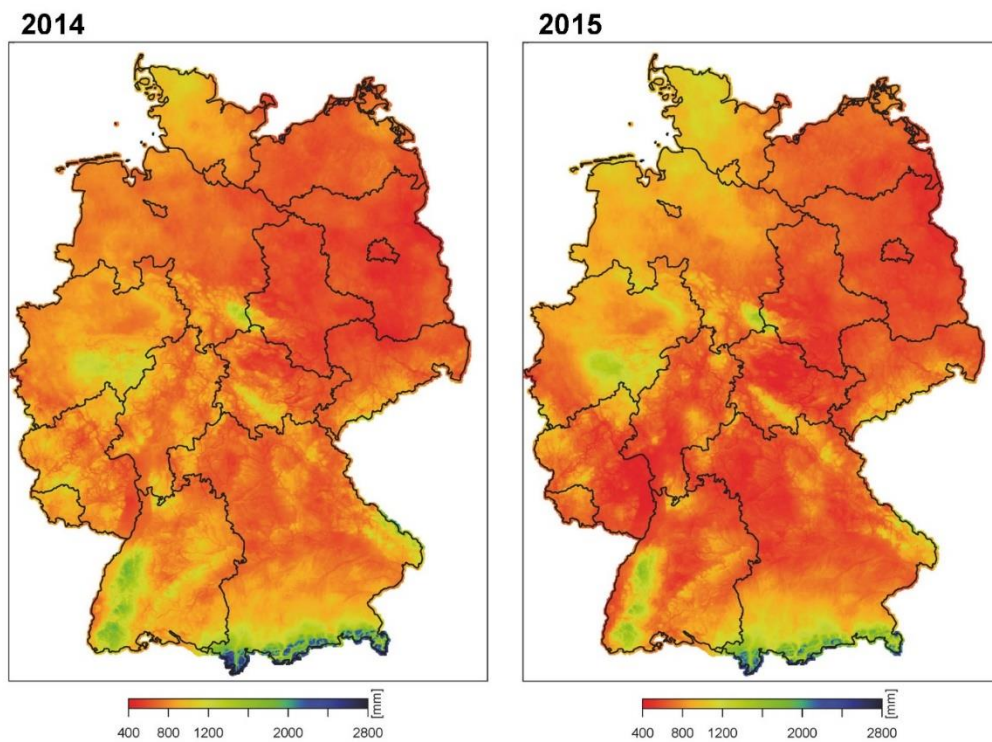


Quelle: Eigene Darstellung, Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft

Plausibility check of the final data product

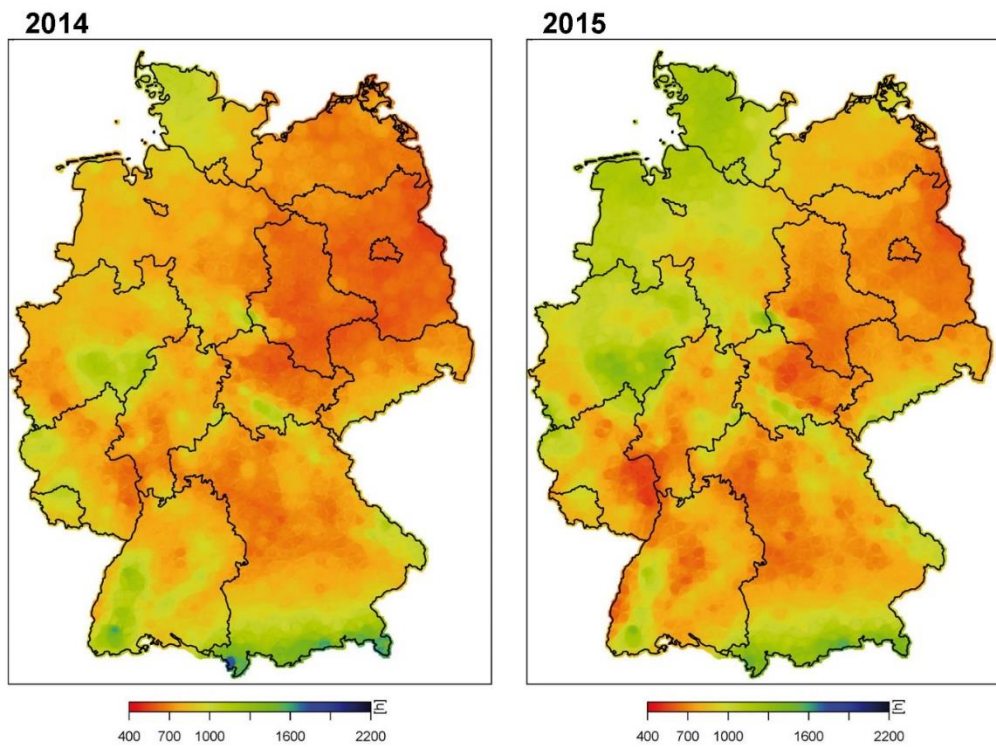
General plausibility of the data product was evaluated by extracting time series for selected locations and comparing them to the corresponding rain gauge time series. Furthermore, a map of annual rainfall sum (Figure III) as well as number of wet hours (Figure IV) was produced for each year. No implausibility was found.

Figure III: Rainfall amount of the final data product for 2014 (left) and 2015 (right)



Quelle: Eigene Darstellung, Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft

Figure I: Number of hours with rainfall for 2014 (left) and 2015 (right)



Quelle: Eigene Darstellung, Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft

Providing time series data

The extraction of rainfall time series can be performed with an R script that is provided together with the data. A specific year as well as the coordinates in different projections can be selected in order to retrieve the data for a specific location in a format that is compatible with AUS-TAL2000N. Optionally, the data can be scaled to the mean annual sum of all ten years. The data product generated within this project is able to provide a suitable rainfall time series for the simulation of pollutants in the atmosphere taking into account wet deposition for any location in Germany.

1 Einleitung

1.1 Problem und Zielstellung

Die Errichtung genehmigungsbedürftiger Anlagen nach Bundesimmissionsschutzgesetz erfordert eine Prüfung nach der technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft (BMU, 2002). Hierfür ist eine Immissionsprognose hinsichtlich der zu erwartenden Schadstoffeinträge durch trockene Deposition zu erstellen. Die TA Luft enthält diesbezüglich Vorgaben, es werden jedoch keine Angaben zur Berücksichtigung der nassen Deposition gemacht, wodurch diese bisher unberücksichtigt blieb. Lediglich bei der Durchführung von Umweltverträglichkeitsprüfungen ist eine Berücksichtigung der nassen Deposition in manchen Fällen gefordert. Es existiert jedoch bisher keine einheitliche Methode, sodass die Vorgehensweise bei der Ermittlung bislang dem Ermessensspielraum des Gutachters überlassen ist. Das Hauptproblem hierbei ist, dass in den meisten Fällen keine geeigneten zeitlich hoch aufgelösten Niederschlagszeitreihen für die geplanten Anlagenstandorte vorhanden sind.

Das Ziel dieses Projekts ist die Bereitstellung geeigneter Niederschlagsdaten nach einem einheitlichen, objektiven und transparenten Verfahren, um eine einheitliche Ermittlung der nassen Deposition zu ermöglichen. Hierfür erfolgt eine räumliche Interpolation von Stationsniederschlagsmessungen für einen zehnjährigen Zeitraum. Die resultierenden Niederschlagsraster decken das gesamte Gebiet der Bundesrepublik Deutschland mit einem 1 km x 1 km Raster ab und sollen für das Auslesen von Zeitreihen genutzt werden. Eine für einen bestimmten Standort ausgelesene Niederschlagszeitreihe soll dann zusammen mit einer ebenfalls standortspezifischen AKTerm die Ausbreitungsrechnung von Luftschadstoffen unter Berücksichtigung nasser Deposition ermöglichen.

1.2 Vorgängerprojekt: Pilotstudie für Niedersachsen

Im Vorgängerprojekt RESTNI (Regionalisierung stündlicher Niederschläge zur Modellierung der nassen Deposition, Forschungskennzahl UFOPLAN: 3710 42 218 2) wurden unterschiedliche Methoden zur Bereitstellung stündlicher Niederschlagsdaten zur Berücksichtigung der nassen Deposition bei der Ausbreitungsrechnung von Luftschadstoffen verglichen. Alle Methoden beinhalteten eine räumliche Interpolation von Stationsbeobachtungen und wurde für das Pilotgebiet Niedersachsen mit Ausbreitungstestrechnungen validiert. Die räumliche Interpolation wurde aus verschiedenen Gründen gegenüber einer stochastischen Niederschlagssimulation favorisiert, z. B. wird durch die Interpolation der Bezug zu den anderen für die Ausbreitungsrechnung wichtigen Klimainformationen über Windgeschwindigkeit, -richtung und atmosphärische Stabilität gewahrt (siehe Umweltbundesamt, 2014).

Räumliche Interpolationsmethoden, insbesondere geostatistische Ansätze, wurden in vielen unterschiedlichen Veröffentlichungen zur Regionalisierung von Niederschlagsinformationen verwendet und bieten allgemein ein weit verbreitetes Verfahren für die Schätzung von Klimainformationen für unbeobachtete Orte. Goovaerts (2000) verwendete z. B. External Drift Kriging (EDK) mit einem digitalen Geländemodell (DGM) als Zusatzinformation für die Interpolation monatlicher und jährlicher Niederschlagssummen und erreichte deutlich bessere Ergebnisse als mit univariaten Methoden. Haberlandt (2007) interpolierte stündliche Niederschläge eines Extremereignisses mit unterschiedlichen Methoden und berichtet, dass die Nutzung von Wetterradar als Zusatzinformation beim EDK eine bessere Niederschlagsschätzung als Ordinary Kriging (OK) und die einfache Interpolation Nächster Nachbar (NN) und Inverse Distanzgewichtung (InvD) liefert. Eine zusätzliche Berücksichtigung des DGM konnte die Schätzung auf Stundenwertbasis nicht verbessern.

Im Rahmen des Vorgängerprojekts, welches sich auf das Bundesland Niedersachsen beschränkte, wurden sowohl Kreuzvalidierungen der Interpolationsgüte als auch Ausbreitungstrecknung für fünf ausgewählte Standorte mit jeweils zwei Jahren durchgeführt. Die einfache Interpolationsmethode NN erreichte ein deutlich schlechteres Ergebnis bei der Kreuzvalidierung der Interpolationsgüte und auch bei den Testrechnungen. Des Weiteren wurde das Verfahren Multi-Step Ordinary Kriging (MS-OK) getestet, welches aus zwei Schritten besteht. Im ersten Schritt erfolgt die Interpolation des Niederschlagsvorkommens mit IK und im Anschluss eine Interpolation der Niederschlagshöhe mit OK. Es konnte im Gegensatz zum einfachen OK ohne vorgeschaltetem IK eine gute Übereinstimmung der Anzahl der Regenstunden in den interpolierten Zeitreihen festgestellt werden. Des Weiteren wurden Radardaten als Zusatzinformation in den Methoden EDK und Multi-Step External Drift Kriging (MS-EDK) berücksichtigt. Alle geostatistischen Interpolationsmethoden konnten die jährliche Niederschlagssumme bei der Interpolation von Stundenwerten nicht reproduzieren, sodass eine Skalierung der Stundenwerte auf wahre Jahressummen und die Werte einer separaten Jahressummeninterpolation durchgeführt wurde. Die Methoden MS-OK und MS-EDK erreichten insgesamt ein ähnliches Ergebnis, allerdings entfällt bei der Methode MS-OK die langwierige Aufbereitung der Wetterradardaten.

Für eine deutschlandweite Bereitstellung von Niederschlagsdaten wurde folglich die Interpolation mit MS-OK empfohlen. Zusätzlich sollte eine Skalierung der interpolierten Stundenwerte auf vorgegebene Jahressummen durchgeführt werden, wobei hierfür die Skalierung auf monatliche Niederschlagswerte des REGNIE-Datensatzes (Rauthe et al., 2013) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) vorgeschlagen wurde. Durch die Verwendung der nach Richter (1995) korrigierten Daten könne zusätzlich die Unterschätzung der eigentlichen stündlichen Niederschlagssumme durch Windeffekte berücksichtigt werden.

1.3 Vorgehensweise zur Bereitstellung deutschlandweiter Niederschlagsdaten

Für die Erstellung des geforderten Niederschlagsdatensatzes sind einige Arbeitsschritte erforderlich. Im Folgenden wird eine chronologische Abfolge der einzelnen Schritte zusammen mit einer kurzen Beschreibung der zugehörigen Tätigkeiten aufgelistet.

1. Datenbeschaffung

Alle für die Erstellung des Datensatzes erforderlichen Daten werden vom DWD bezogen, wobei die Stationsmessungen des Niederschlags direkt vom Climate Data Center FTP-Server heruntergeladen und die monatlichen REGNIE-Daten durch das Umweltbundesamt bestellt werden (REGNIE: Regionalisierte Niederschlagshöhen).

2. Datenaufbereitung und -prüfung

Alle Niederschlagszeitreihen werden auf Fehlwerte und Datenlücken geprüft. Zusätzlich erfolgte eine Überprüfung auf Datenausreißer und Zeitreihenhomogenität. Die REGNIE-Daten liegen in einem polaren Koordinatensystem vor und müssen in ein kartesisches Koordinatensystem überführt werden.

3. Anpassung und Überprüfung der Interpolationsmethodik für Gesamtdeutschland

Die im Pilotprojekt entwickelte Interpolationsmethode muss für das Gesamtgebiet der Bundesrepublik Deutschland angepasst und getestet werden. Es sind kleine Änderungen im Programmcode der Interpolationsmethodik erforderlich.

4. Variographie des Niederschlagsvorkommens und der Niederschlagshöhe

Alle die geostatistische Methode MS-OK erfordert eine Quantifizierung der räumlichen Variabilität des Niederschlags und des Niederschlagsvorkommens. Hierfür erfolgen jeweils das Schätzen eines experimentellen Variogramms und das Anpassen eines theoretischen Variogrammodells.

5. Kreuzvalidierung mit anschließender Kartierung des Kreuzvalidierungsfehlers

Der Fehler, welcher bei der Niederschlagsschätzung durch räumliche Interpolation entsteht, muss im Vorfeld der Anwendung von MS-OK bestimmt werden. Es erfolgt die Bestimmung eines Fehlerkriteriums für jede Station und jedes Jahr mit einer nachfolgenden Erstellung räumlicher Fehlerkarten. Hierdurch soll überprüft werden, ob der Interpolationsfehler, der für das Pilotprojekt in Niedersachsen erzielt wurde, in den anderen Regionen Deutschlands in einer ähnlichen Größenordnung liegt. Die Interpolation des Kreuzvalidierungsfehlers mit OK erfordert die Bestimmung eines zusätzlichen Variogramms.

6. Interpolation mit MS-OK

Die eigentliche Interpolation des Niederschlags erfolgt im Anschluss an die Kreuzvalidierung mit dem zweistufigen Verfahren MS-OK.

7. Durchführen der Skalierung auf REGNIE-Monatswerte

Die aus der Interpolation mit MS-OK resultierenden Stundenwertraster werden durch die Multiplikation mit monatlichen Skalierungsfaktoren den Niederschlagssummen des REGNIE-Datensatzes angeglichen.

8. Bereitstellung der Daten

Das skalierte Datenprodukt wird in einem offenen und maschinenunabhängigen Datenformat gespeichert und es wird ein Programm bereitgestellt, mit dem für einen beliebigen Anlagenstandort innerhalb Deutschlands eine einjährige Niederschlagszeitreihe ausgelesen werden kann.

9. Plausibilitätsprüfung des finalen Datenprodukts

Im letzten Schritt erfolgt eine Plausibilitätsprüfung der Niederschlagsdaten. Für ausgewählte Stationsstandorte ausgelesene Zeitreihen werden mit den korrespondierenden Beobachtungszeitreihen verglichen und es werden Karten der jährlichen Niederschlagssumme und der Anzahl der Regenstunden erstellt.

2 Interpolationsmethodik

2.1 Variographie

Alle geostatistischen Methoden erfordern vor ihrer Anwendung eine Beschreibung der räumlichen Kontinuität der zu interpolierenden Variable. Die Punktmessungen stündlichen Niederschläge werden ausgewertet und hinsichtlich ihrer Unterschiedlichkeit in Abhängigkeit ihrer Entfernung voneinander untersucht. Für die Analyse wird das Semivariogramm verwendet, welches hier auch vereinfacht als Variogram bezeichnet wird. Die Berechnung eines experimentellen Variogramms erfolgt durch

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2 \cdot N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(u_i) - Z(u_j)]^2, \quad (\text{Gl. 1})$$

wobei h die betrachtete Distanzklasse, $N(h)$ die Anzahl der Messpunktpaare welche zur betrachteten Distanzklasse gehören, $Z(u_i)$ bzw. $Z(u_j)$ den Wert einer Variablen am Ort u_i bzw. u_j und $\gamma^*(h)$ den Variogrammwert für die Distanzklasse darstellt. Vor dem Anwenden von Gleichung 1 erfolgt eine Einteilung der Entfernungsvektoren aller Messpunktpaare in Distanzklassen. Die klassenweise Berechnung des Variogrammwerts erfolgt dann nur unter Berücksichtigung aller Messpunktpaare welche in die entsprechende Distanzklasse fallen. Durch ein Auftragen der gemittelten Differenzenquadrate gegenüber der Distanzklassen kann im Vergleich zum Auftragen der Differenzenquadrate für die einzelnen Entfernungsvektoren gegenüber der Distanz eine bessere Darstellung der räumlichen Kontinuität ermöglicht werden.

Die Anpassung eines theoretischen Modells an das experimentelle Variogram wird hier mit einem exponentiellen Modell in Kombination mit dem „Nuggeteffekt“ vorgenommen (Gl. 2):

$$\gamma(h) = c_0 + c \left[1 - \exp\left(-\frac{h}{a}\right) \right], \quad (\text{Gl. 2})$$

Das Variogram ist definiert durch die Parameter c_0 = Nuggetvarianz (nugget), c = Schwellenwert (sill). Der Parameter a legt den Einflussbereich (range) der räumlichen Abhängigkeit des Niederschlags fest. An dieser Stelle ist h nicht die Bezeichnung einer konkreten Distanzklasse sondern die kontinuierlich zunehmende Entfernung, von der der Wert des theoretischen Variogrammodells abhängig ist.

Theoretisch müsste für jeden Zeitschritt eine separate Variogrammschätzung erfolgen. Bei einem Gesamtzeitraum von zehn Jahren mit Stundenwerten ist dieses Vorgehen nicht praktikabel, sodass für die Interpolation ein mit der Varianz normiertes und über Gesamtzeitraum von 2006 bis 2015 gemitteltes Variogram verwendet wird. Um Zeitschritte ohne Niederschlag auszuschließen, werden lediglich alle Stunden bei der Berechnung berücksichtigt, für die der Mittelwert aller Beobachtungen größer gleich 0,01 mm ist.

$$\gamma_{\text{avg}}^*(h) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\gamma_i^*(h)}{\text{var}(i)}. \quad (\text{Gl. 3})$$

Hierbei ist n die Anzahl der stündlichen Zeitschritte, $\gamma_i^*(h)$ der Variogrammwert der Distanzklasse h zum Zeitpunkt i und $\text{var}(i)$ die Varianz aller Messwerte zum Zeitpunkt i .

Verworn und Haberlandt (2011) untersuchten unterschiedliche Methoden zur Variogrammschätzung bei der Interpolation stündlicher Niederschläge mit OK und EDK, wobei Radarinformationen beim EDK als Zusatzinformation verwendet wurden. Neben dem beschriebenen mitt-

leren Variogramm erfolgte die Berücksichtigung ereignis- und jahreszeitspezifischer Variogramme und automatisch angepasster zeitschrittspezifischer Variogramme. Die Ergebnisse zeigten, dass die Interpolationsgüte sowohl für OK als auch für EDK nicht stark zwischen den einzelnen Methoden zur Bestimmung des Variogramms schwankt, lediglich ein einfach als linear angenommenes Variogramm sollte nicht verwendet werden. Die Anwendung eines mittleren Variogramms ist daher für die Interpolationen im Rahmen dieses Projektes ausreichend genau.

Die Einteilung der Distanzklassen erfolgt in Abhängigkeit der Anzahl der Messpunkte, sodass ein Anpassen eines theoretischen Modells, d. h. die Bestimmung der Parameter Sill, Nugget und Range, möglich ist.

2.2 Multi-Step Ordinary Kriging

Die Interpolationsmethode MS-OK wird an dieser Stelle nur kurz zusammengefasst. Für eine ausführlichere Beschreibung der geostatistischen Theorie wird an dieser Stelle auf den Abschlussbericht des Vorgängerprojekts (Umweltbundesamt, 2014) und allgemein auf geostatistische Lehrbücher (Akin und Siemes, 1988; Goovaerts, 1997) verwiesen.

Die Grundlage von MS-OK ist die Interpolationsmethode Ordinary Kriging (OK). Hierbei handelt es sich um den bekanntesten und am häufigsten verwendeten Interpolationsansatz der Geostatistik, wobei nur Informationen aus einer Datenquelle herangezogen werden können (univariate Methode). Ein Nachteil aller geostatistischen Interpolationsmethoden ist der im Vergleich zu einfacheren Techniken wie Nächster Nachbar (NN) oder Inverse-Distanz-Verfahren (InvD) relativ hohe numerische Berechnungsaufwand. Außerdem kann durch eine manuelle Variogrammerstellung bzw. Variogrammanpassung ein beträchtlicher Zusatzaufwand entstehen.

Die generelle Idee der geostatistischen Methoden ist ähnlich zur Vorgehensweise bei den einfachen Interpolationsmethoden. Für einen unbeobachteten Ort u_0 soll ein Schätzwert $Z^*(u_0)$ aus gemessenen Werten benachbarter Punkte ermittelt werden. Beim OK erfolgt die Bestimmung der Gewichte der einzelnen Nachbarwerte durch das Variogramm, d. h. durch die räumliche Variabilität der zu interpolierenden Messgröße.

Die Ermittlung von $Z^*(u_0)$ erfolgt als gewichtetes Mittel der benachbarten Punktwerte $Z(u_i)$, wobei u_i hier für die Orte der benachbarten Messpunkte steht. Im allgemeinen Fall stellt der Krigingschätzer eine Linearkombination gewichteter Messwerte aus n benachbarten Messpunkten dar (Gl. 4).

$$Z^*(u_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(u_i) \quad (\text{Gl. 4})$$

Die Gewichte λ_i werden so bestimmt, dass der Schätzwert $Z^*(u_0)$ des unbekannten wahren Wertes $Z(u_0)$ erwartungstreu (Bedingung 1, Gl. 5) und der mittlere quadratische Fehler minimal ist (Bedingung 2, Gl. 6).

$$E[Z_0^* - Z_0] = 0 \quad (\text{Gl. 5})$$

$$E[Z_0^* - Z_0]^2 = \text{Min} \quad (\text{Gl. 6})$$

Bei Abwesenheit eines räumlichen Trends, d. h. im Fall von Stationarität, ist der Erwartungswert $E[Z(u_i)] = m$ und $Z_0 = m$. Aus der Bedingung Erwartungstreue erfolgt somit:

$$E\left[\sum_{i=1}^n \lambda_i Z(u_i) - Z_0\right] = \sum_{i=1}^n \lambda_i m - m = m\left(\sum_{i=1}^n \lambda_i - 1\right) = 0 \quad (\text{Gl. 7})$$

Hieraus folgt, dass die Summe der Gewichte 1 sein muss.

Der Erwartungswert des quadratischen Fehlers kann mit Hilfe des Variogramms ausgedrückt werden:

$$E[Z_0^* - Z_0]^2 = \text{var}(Z_0^* - Z_0) = 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(u_i - u_0) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j \gamma(u_i - u_j) \quad (\text{Gl. 8})$$

Um die Fehlervarianz unter Bedingung 1 zu minimieren wird ein Lagrange-Multiplikator μ eingeführt, sodass anstatt Gleichung 11 die Funktion $\varphi = \varphi(\lambda_1, \dots, \lambda_n, \mu)$ minimiert wird.

$$\varphi = \text{var}(Z_0^* - Z_0) - 2\mu \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i - 1 \right) \quad (\text{Gl. 9})$$

Durch das zu Null setzen der partiellen Ableitungen $\frac{\partial \varphi}{\partial \lambda_i}$, $i = 1, \dots, n$ und $\frac{\partial \varphi}{\partial \mu}$ kann das lineare Kriging-Gleichungssystem mit $n+1$ Gleichungen hergeleitet werden.

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n \lambda_j \gamma(u_i - u_j) + \mu &= \gamma(u_i - u_0) \text{ für } i = 1, 2, \dots, n \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j &= 1 \end{aligned} \quad (\text{Gl. 10})$$

Durch mehrmaliges Lösen des Kriging-Gleichungssystems lassen sich die Gewichte λ_i für jeden Punkt des Interpolationsrasters bestimmen, sodass im Anschluss eine Berechnung des Schätzwerts nach Gleichung 7 erfolgen kann. Im Rahmen dieses Projektes wurde die Geostatistical Software Library von Deutsch und Journel (1992) für die geostatistische Interpolation der Einzelzeitschritte verwendet.

Indikator Kriging (IK) ist eine Möglichkeit der Anwendung von OK auf kategorisierte Daten wie z. B. Niederschlagsvorkommen. Hierfür wird eine Transformation der aus zwei Klassen bestehenden Interpolationsvariable in zwei Indikatorvariablen durchgeführt. Gleichung 11 liefert die Definition der Indikatorvariablen in Abhängigkeit der gemessenen Niederschlagsmenge.

$$I_C(u) = \begin{cases} 1 & \text{wenn } u \geq 0,1 \text{ mm} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (\text{Gl. 11})$$

Die Indikatorvariable I kann als Wahrscheinlichkeit dafür betrachtet werden, dass der Ort u zur der entsprechenden Kategorie C gehört, d. h. ob in der betrachteten Stunde Regen gefallen ist oder nicht.

$$I_C(u) = P[u \in C] \quad (\text{Gl. 12})$$

Gleichung 13 liefert folglich den Schätzer der Wahrscheinlichkeit von $u_0 \in C$.

$$I_C^*(u_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i I_C(u_i) \quad (\text{Gl. 13})$$

Die Gewichte können im Anschluss mit dem Gleichungssystem von Ordinary Kriging (Gl. 10) bestimmt werden, sodass die Wahrscheinlichkeit I_C^* für jeden Ort u geschätzt werden können. Bei der Kombination von OK und IK zum MS-OK erfolgt die Schätzung der Regenwahrscheinlichkeit für jede Zelle des Interpolationsrasters. Ab einer Wahrscheinlichkeit von größer gleich 0,5 wird der entsprechende Ort als nass angenommen. Da die Trennung zwischen Trocken- und Nasspha-

sen als besonders wichtig für die Depositionsberechnung erachtet wird, wird die eigentliche Niederschlagshöhe im Anschluss nur für die nassen Rasterzellen berechnet, während den trockenen Rasterzellen der Niederschlagswert 0,0 mm zugewiesen wird.

2.3 Bewertung der Interpolationsgüte

Die Interpolationsgüte des vorherig beschriebenen Verfahrens wird mit Hilfe der Kreuzvalidierung bewertet. Hierbei werden sukzessive für jeden Beobachtungspunkt aus den bekannten Nachbarpunkten Schätzwerte interpoliert, ohne dass der Wert am jeweiligen Zielpunkt selbst mit verwendet wird. Anschließend erfolgt ein Vergleich der beobachteten Werte $Z(u)$ mit den interpolierten Werten $Z^*(u)$. Als Maßstäbe für die Interpolationsgüte finden das folgende Kriterium Anwendung, welches stationsweise separat für jedes Jahr berechnet wird:

$$\text{RMSE}_{\text{Station}} = \frac{1}{\bar{Z}} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z^*(u_i) - Z(u_i))^2} \quad \text{mit } Z^*(u_i) > 0 \text{ oder } Z(u_i) > 0. \quad (\text{Gl. 14})$$

Hierbei ist $\bar{Z}$ der Mittelwert der beobachteten Niederschlagswerte und n die Anzahl der Zeitschritte. Es werden alle Zeitschritte bei der Berechnung des Gütekriteriums berücksichtigt, in denen entweder die Schätzung oder Schätzung der Niederschlagshöhe größer als 0,00 mm ist.

Im Anschluss erfolgt die Ermittlung einer Fehlerkarte für jedes Jahr des Interpolationszeitraums. Hierfür wurde eine Variogrammschätzung des Fehlerkriteriums für den Gesamtzeitraum von 2006 bis 2015 und im Anschluss eine jahresweise Interpolation durchgeführt.

2.4 Niederschlagsskalierung

Das Vorgängerprojekt, in dem unterschiedliche Interpolationsmethode für die Pilotregion Niedersachsen evaluiert wurden, zeigte, dass teilweise deutliche Abweichungen im Vergleich zur Jahressumme entstehen können, wenn stündliche Niederschläge interpoliert werden. Um diese möglichen Abweichungen zu vermeiden erfolgt eine Skalierung der stündlichen Niederschlagszeitreihen auf die nach Richter (1995) korrigierten REGNIE-Monatssummen des DWD. Hierfür wird für jeden Rasterpunkt mit den Koordinaten i,j der Monatsniederschlag der MS-OK Interpolation berechnet ($N_{i,j}^{\text{MS-OK}}$) und ein Korrekturfaktor in Abhängigkeit des korrespondierenden REGNIE-Werts ($N_{i,j}^{\text{REGNIE}}$) ermittelt, mit dem die Niederschlagshöhen der MS-OK Stundenwerte multipliziert werden:

$$k_{i,j} = \frac{N_{i,j}^{\text{REGNIE}}}{N_{i,j}^{\text{MS-OK}}} \cdot \quad (\text{Gl. 15})$$

Durch die monatsweise Skalierung kann zusätzlich der jahreszeitliche Verlauf der Unterschätzung der Stundenwertbeobachtungen durch Windeffekte berücksichtigt werden. Im Allgemeinen ist diese Unterschätzung in den Wintermonaten deutlich höher, da es hier zu einem vermehrten Schneeanteil an der Gesamtniederschlagsmenge kommt.

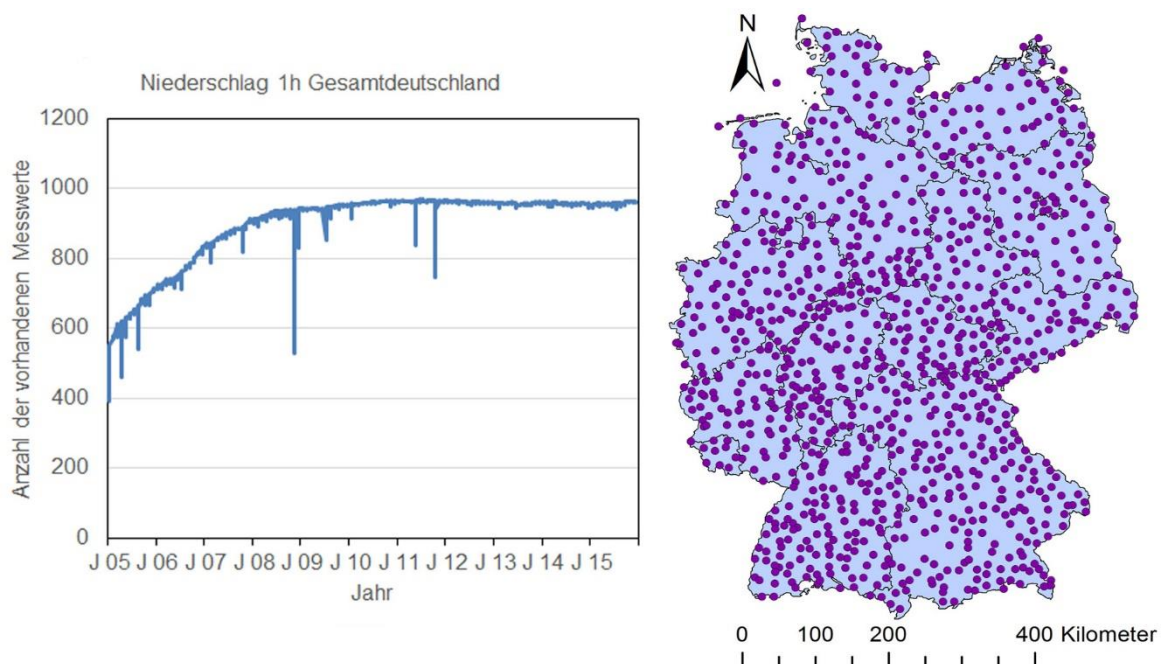
3 Datenaufbereitung

3.1 Datenbeschaffung für das Interpolationsgebiet

Es wurden die Zeitreihen von 1007 Niederschlagsstationen mit einstündiger zeitlicher Auflösung vom Climate Data Center des Deutschen Wetterdienstes bezogen. Abbildung 1 enthält auf der linken Seite den zeitlichen Verlauf der Stationsmessungen im Zeitraum von 2005 bis 2015. Aufgrund des deutlichen Anstiegs der Anzahl der vorhandenen Messwerte in den ersten Jahren des dargestellten Zeitraums, werden die von 2006 bis 2015 für die Bereitstellung der Niederschlagsraster verwendet. Auf der rechten Seite sind die Standorte aller Messstationen verzeichnet. Insgesamt sind diese weitestgehend gleichmäßig über das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland verteilt.

Der sprunghafte Rückgang der Stationsanzahl für einige Zeitschritte ist laut des Deutschen Wetterdienstes (E-Mail, Elsbeth Penda, 19.08.2016) höchstwahrscheinlich auf einen Fehler in den automatischen Prüfroutinen zurückzuführen. Es ist keine signifikante Beeinträchtigung der Qualität des hier erstellten Datensatzes zu erwarten, da lediglich drei einstündige Zeitschritte betroffen sind. Direkt in der darauffolgenden Stunde ist jeweils wieder die übliche Stationsanzahl verfügbar.

Abbildung 1: Zeitlicher Verlauf der vorhandenen stündlichen Stationsmessungen (links) und Standorte der Niederschlagsstationen innerhalb Deutschlands (rechts).



Quelle: Eigene Darstellung, Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft

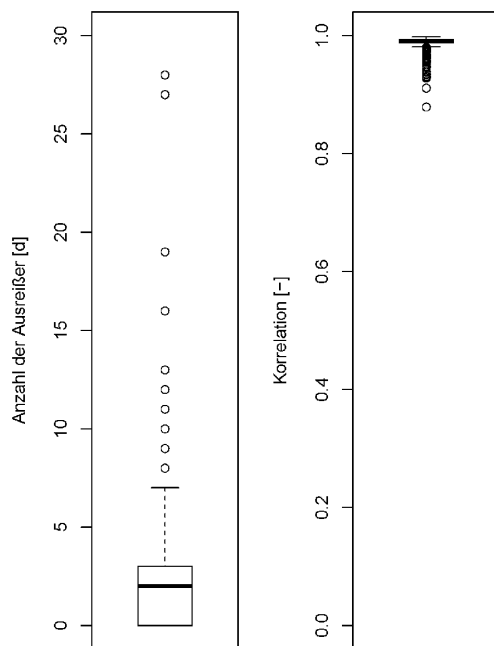
Zusätzlich erfolgte das Herunterladen der REGNIE-Tageswerte vom DWD. Diese nicht nach Richter (1995) korrigierten Daten wurden lediglich für die Überprüfung der Stundenwertzeitreihen auf Ausreißer verwendet (siehe Abschnitt 3.2). Die korrigierten REGNIE-Monatswertraster wurden durch das Umweltbundesamt beim DWD bestellt und werden, wie unter Abschnitt 2.4 beschrieben, für die Skalierung der aus den Stationsdaten erstellten Interpolationsraster verwendet.

3.2 Aufbereitung und Prüfung der Stationsdaten

Alle Niederschlagszeitreihen wurden bezüglich ihrer Konsistenz überprüft. Lücken in den Zeitreihen wurden durch Fehlwertkennungen aufgefüllt.

Im nächsten Arbeitsschritt erfolgte die Prüfung auf Ausreißer. Es wurde eine Überprüfung von möglichen Ausreißern mit den nichtkorrigierten REGNIE Tageswerten durchgeführt. Die stündlichen Stationsmessungen wurden hierfür zu Tageswerten aggregiert und im Anschluss mit den zugehörigen Werten des REGNIE-Tageswertrasters verglichen. Ein Tag wurde als Ausreißer markiert, wenn die Abweichung von Stationsmessung und REGNIE-Tageswert größer als 8 mm ist. Um Zeitschritte mit wenig Niederschlag bei der Ausreißerkorrektur zu berücksichtigen wurde eine weitere Bedingung eingeführt. Wenn die Stationsmessung mehr als das Doppelte oder weniger als die Hälfte des REGNIE-Wertes beträgt, erfolgt ebenfalls eine Entfernung des entsprechenden Tages der Stationsmessungen. Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse der Ausreißerprüfung für den zehnjährigen Gesamtzeitraum. Die linke Box enthält die Anzahl der Ausreißertage für die ca. 1000 Stationen. Mit den gewählten Parametern wird ein Median von ca. 2.5 Ausreißertagen erreicht. Bei wenigen Stationen treten bis zu 28 Ausreißertage auf. Die rechte Box enthält die Korrelation der aggregierten Stationsmessungen mit den REGNIE-Tageswerten und dient nur zu Kontrollzwecken.

Abbildung 2: Ergebnisse der Ausreißerbestimmung mit REGNIE-Tageswerten



Quelle: Eigene Darstellung, Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft

Zusätzlich wurde eine Überprüfung der Zeitreihenhomogenität für jede Station mit dem Verfahren der Doppelsummenanalyse durchgeführt, wobei der Mittelwert der 30 nächstgelegenen Stationen als Bezugsreihe verwendet wurde. Es konnten keine Inhomogenitäten hierdurch gefunden werden. Die visuell ausgewerteten Plots der Doppelsummenanalyse sind in Anhang 9.1 für ausgewählte Stationen enthalten. Die weiteren Grafiken weisen eine sehr hohe Ähnlichkeit auf und werden deshalb nicht beigelegt.

3.3 Aufbereitung der REGNIE-Daten

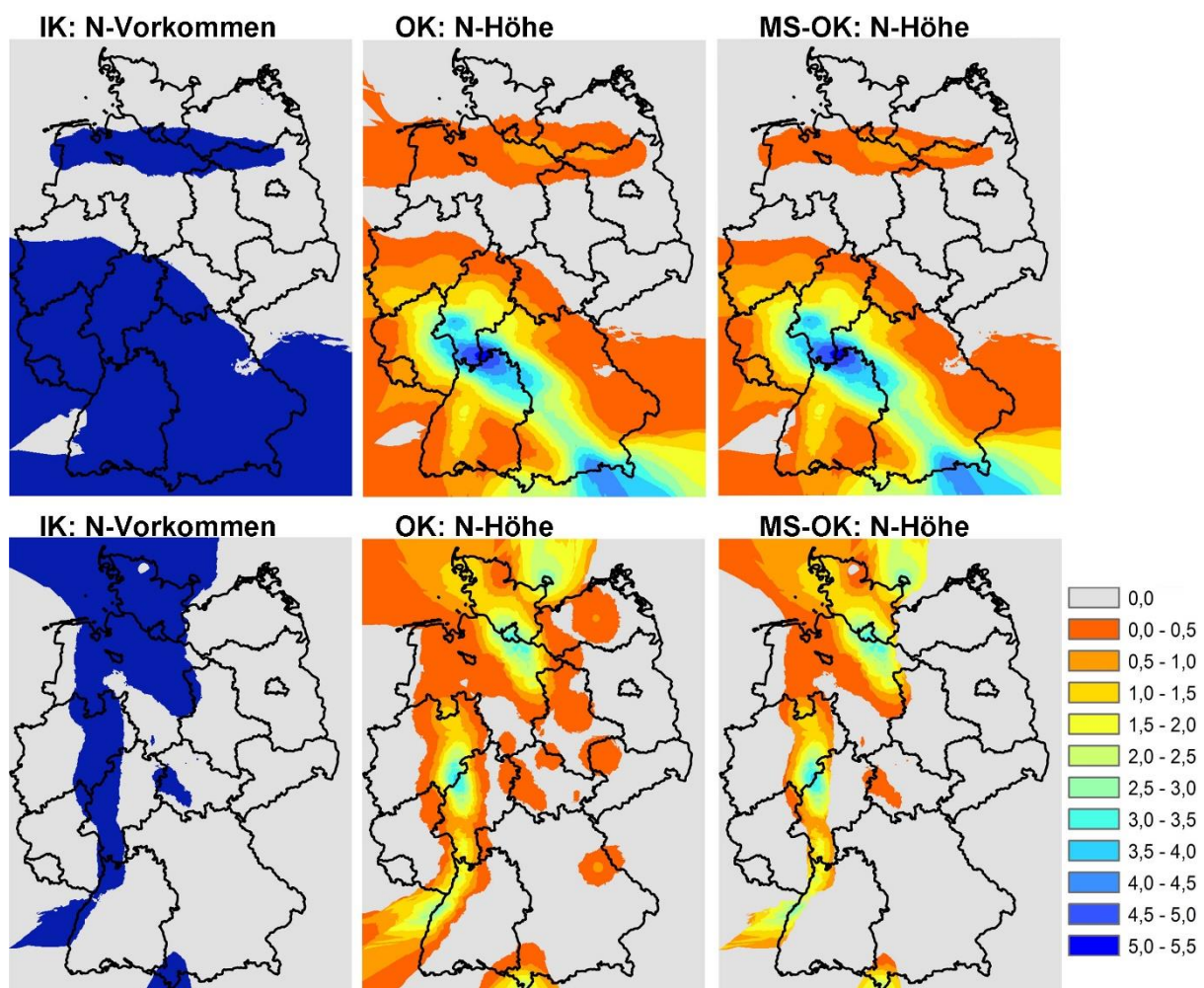
Die REGNIE-Niederschlagswerte liegen in geografischen Koordinaten vor, wobei ein Längengrad durch 60 Gitterpunkte und ein Breitengrad durch 120 Gitterpunkte abgebildet wird, was in etwa einer Auflösung von 1 km entspricht (Deutscher Wetterdienst, 2013). Die Koordinaten aller REGNIE-Gitterpunkte wurden in das Koordinatensystem der Stationsinterpolation (Gauß-Krüger im 3. Meridianstreifen) umgerechnet. Danach erfolgte eine räumliche Interpolation der REGNIE-Datenpunkte mit dem Nächster-Nachbar Verfahren auf das Interpolationsraster mit einer Auflösung von 1 km x 1km. Aufgrund der hohen Punktdichte des REGNIE-Rasters ist keine bedeutsame Verschlechterung der Datengüte durch die Interpolation mit diesem einfachen und nicht glättenden Verfahren zu erwarten.

4 Ergebnisse der Interpolation

4.1 Überprüfung der Interpolationsmethodik für Gesamtdeutschland

Wie in Abschnitt 1.3 bereits erwähnt, erfolgte eine Überprüfung der Interpolationsroutinen für das Gesamtgebiet der Bundesrepublik Deutschland. Alle Interpolationsprogramme wurden bereits erfolgreich für das Bundesland Niedersachsen im Vorgängerprojekt angewandt und mussten im Rahmen dieses Projektes leicht modifiziert werden. Die Überprüfung der Routinen erfolgte durch die Interpolation einzelner Zeitschritte mit einer signifikanten Niederschlagsmenge und einer darauffolgenden Überprüfung der Interpolationsraster. Abbildung 3 enthält jeweils drei graphische Darstellungen für zwei unterschiedliche Stundenzeitschritte. Auf der linken Seite ist jeweils das aus dem IK resultierende Raster des Niederschlagsvorkommens dargestellt, während in der Mitte sich das aus einem einfachen OK resultierende Raster der Niederschlagshöhe befindet. Die rechte Seite zeigt das MS-OK Ergebnis.

Abbildung 3: Beispiel der Interpolation mit MS-OK für Gesamtdeutschland für den 3.1.2015 19:00 (oben) und den 4.8.2015 17:00 (unten). Die Farbskala liefert die Niederschlagshöhe [mm] in den Unterabbildungen für OK und MS-OK, während die dunkelblau markierten Flächen die nassen Bereiche aus dem IK markieren.



Quelle: Eigene Darstellung, Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft

Es ist erkennbar, dass sowohl für das Niederschlagsvorkommen als auch die Niederschlagshöhe eine plausible räumliche Verteilung erzielt wird. Die MS-OK Karten zeigen, dass der Niederschlag insbesondere in den Randzonen der laut OK nassen Gebiete zu Null gesetzt wird. Beim unteren Ereignis (konvektives Sommerereignis) ist deutlich zu erkennen, dass teilweise Niederschlag an isolierten Stationen gefallen ist, d. h. alle direkten Nachbarstationen keinen Niederschlag in der betrachteten Stunde aufgezeichnet haben. Dies zeigt sich durch die kreisförmigen Strukturen welche durch MS-OK entstehen, dann allerdings beim MS-OK nicht mehr vorhanden sind. OK erzeugt im Allgemeinen eine Glättung räumlicher Niederschlagsfelder und MS-OK erzielt eine scharfe Trennung zwischen trockenen und nassen Bereichen der interpolierten Karte. Wenn standortspezifische Zeitreihen aus Interpolationsrastern extrahiert werden, kommt es dadurch zu einem realistischeren Verhältnis von nassen zu trockenen Stunden.

4.2 Variogrammerstellung für das Interpolationsgebiet

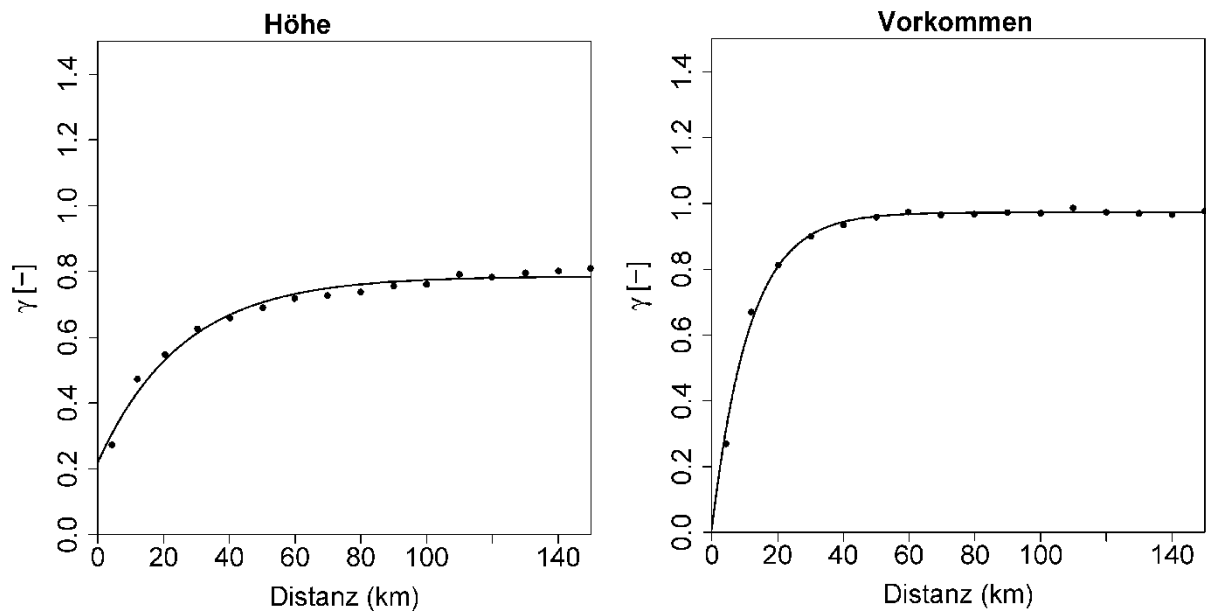
Es wurden Variogramme für die Interpolation des Niederschlags und die Interpolation des Niederschlagsindikators erstellt, welche in Abbildung 4 dargestellt sind. In beiden Fällen wurde für die Interpolation ein über den Gesamtzeitraum gemitteltes Variogramm verwendet, obwohl die räumliche Struktur des Niederschlags im Allgemeinen eine zeitliche Variabilität aufweist. Laut Verworn und Haberlandt (2011) kann ein zeitlich variables Variogramm im Vergleich zu einem mittleren Variogramm die Interpolationsgüte nur geringfügig verbessern.

Das Variogramm des Kreuzvalidierungsfehlers, welches zur Erstellung der Fehlerkarten benötigt wird, ist in Abbildung 5 enthalten. Die Vorgehensweise zur Ermittlung des Fehlerkriteriums ist in Abschnitt 2.3 beschrieben. Die Zahlenwerte der Parameter, welche aus einer Anpassung des theoretischen Modells resultieren sind in Quelle: Eigene Darstellung, Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft

Tabelle 4-1 enthalten. Insgesamt ist bei allen Interpolationsvariablen eine eindeutige und einfache Anpassung möglich.

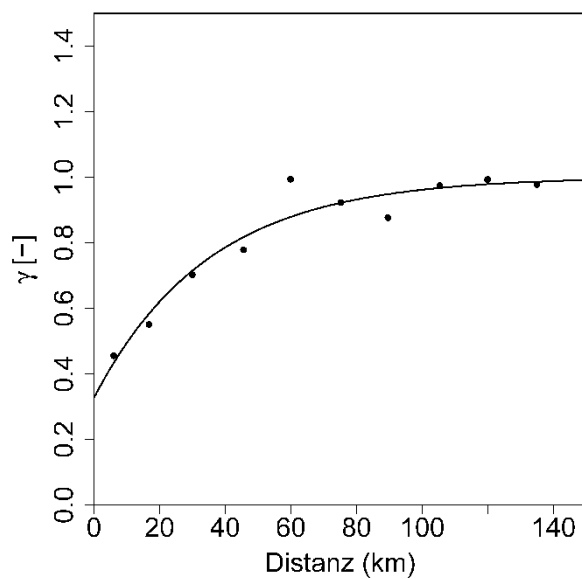
Der Einflussbereich (Range) zeigt, dass die Niederschlagshöhe eine deutlich höhere räumliche Persistenz aufweist als das Niederschlagsvorkommen. Allerdings zeigt diese auch einen relativ hohen Nuggeteffekt, d. h. bei sehr geringen Distanzen kann es im Allgemeinen schon zu einer deutlichen Unterschiedlichkeit der Messwerte kommen. Das Variogramm des Kreuzvalidierungsfehlers besitzt den höchsten Nuggeteffekt und gleichzeitig die größte Range. Es wird vermutet, dass die lokale Stationsdichte den größten Einfluss auf den Fehler hat und daher auch die generelle Existenz einer räumlichen Persistenz des Interpolationsfehlers an Unterschiede in der lokalen Stationsdichte geknüpft ist. Die Variogrammanpassung ist nicht so eindeutig wie bei den Niederschlagsvariablen, da einige Punkte etwas von der Linie des theoretischen Modells abweichen.

Abbildung 4: Mittleres Variogramm der Niederschlagshöhe (links) und des Niederschlagsindicators (rechts)



Quelle: Eigene Darstellung, Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft

Abbildung 5: Mittleres Variogramm des Kreuzvalidierungsfehlers



Quelle: Eigene Darstellung, Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft

Tabelle 4-1: Parameter des exponentiellen Variogrammmodells

Variable	Nugget c_0 [-]	Partieller Sill c [-]	Range a_{eff} [km]
Niederschlagshöhe	0.22	0.57	25,46
Niederschlagsvorkommen	0.01	0.98	11,37
Interpolationsfehler	0.33	03.67	4,97

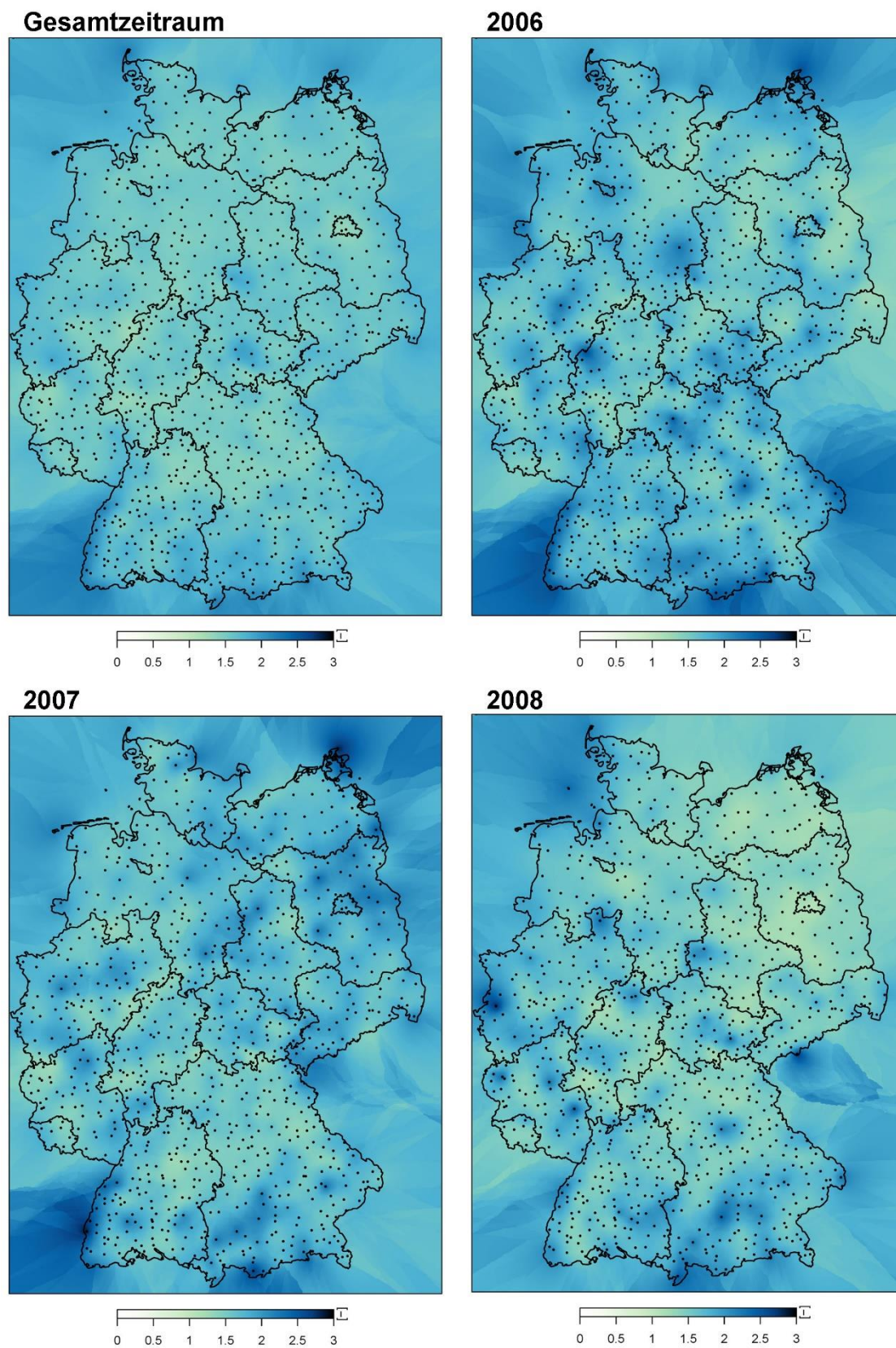
4.3 Kartierung des jährlichen Kreuzvalidierungsfehlers

Abbildung 6 zeigt ausgewählte Fehlerkarten. Es ist der Gesamtzeitraum und jeweils die Jahre 2006 bis 2008 dargestellt. Die für die übrigen Jahre produzierten Karten sind in Anhang 0 zu finden. Die kleinen schwarzen Punkte repräsentieren das Stationsmessnetz des DWD.

Der Fehler ist relativ homogen für den Gesamtzeitraum, wobei es leichte Schwankungen in Abhängigkeit der lokalen Stationsdichte gibt. In den Randbereichen Deutschlands ist der Interpolationsfehler etwas höher, da keine Stationen der Nachbarländer berücksichtigt wurden. Es ist im Allgemeinen keine signifikant schlechtere Interpolationsgüte in den Alpen und den Mittelgebirgsregionen festzustellen.

Die Fehlerkarten der einzelnen Jahre weisen vergleichsweise eine deutlich höhere räumliche Variabilität auf. Zusätzlich ist eine signifikante zeitliche Variabilität des Fehlers aus dem Vergleich der Einzeljahre ersichtlich. Ursache hierfür sind einzelne Niederschlagsereignisse die nur von einer oder wenigen Stationen erfasst wurden und dadurch sehr hohe Interpolationsfehler aufweisen. Allgemein handelt es sich hierbei um konvektive Niederschlagsereignisse, welche durch kleine, sich schnell bewegende Niederschlagszellen gekennzeichnet sind. Es kann auch für die einzelnen Jahre keine Korrelation des räumlichen Fehlers mit der Topographie festgestellt werden. Aufgrund des hier auf Stationszeitreihen und nicht wie im Vorgängerprojekt auf einzelne Zeitschritte bezogenen Fehlerkriteriums sind die zahlenmäßigen Fehlerangaben nicht direkt mit denen aus dem Vorgängerprojekt zu vergleichen. Der Fehler lag im Vorgängerprojekt im Jahr 2009 bei 1,372, wobei das Kriterium als Mittelwert über alle Zeitschritte, in denen der mittlere Stationsniederschlag größer gleich 0,1 mm ist, berechnet wurde (siehe Umweltbundesamt, 2014). Der hier für Stationszeitreihen berechnete und in den Karten interpoliert dargestellte Fehler liegt in einer ähnlichen Größenordnung.

Abbildung 6: Karten des Gesamtfehlers und jeweils des Fehlers der Jahre 2006 bis 2008



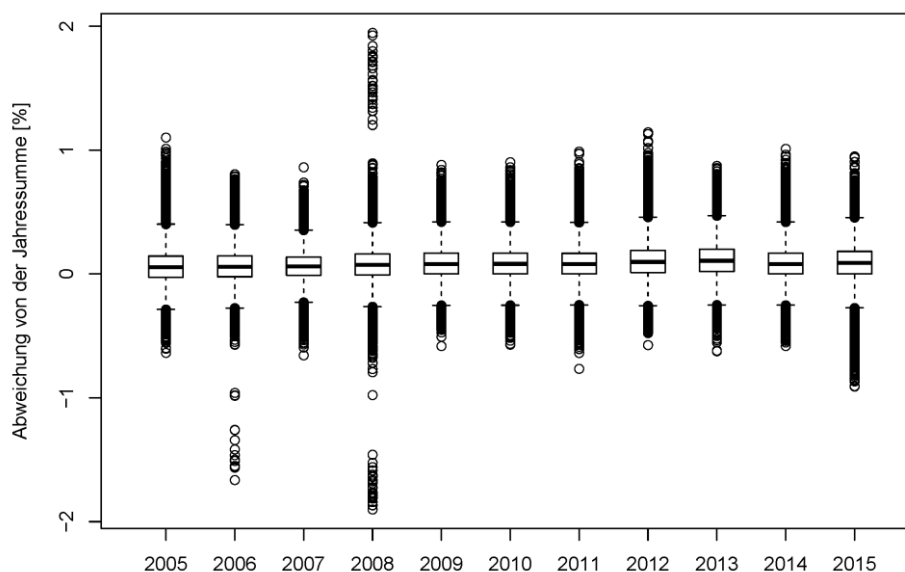
Quelle: Eigene Darstellung, Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft

4.4 Skalierung auf REGNIE-Monatswerte

Bei der geostatistischen Interpolation von Stundenniederschlag kann es zu deutlichen Abweichungen von der eigentlichen Jahressumme kommen. Dieses Problem wurde im Pilotprojekt für Niedersachsen festgestellt und soll wie empfohlen durch eine Skalierung mit auf die Monatswerte des nach Richter (1995) korrigierten REGNIE-Datensatz des DWD behoben werden. Die monatsweise Skalierung erlaubt eine Berücksichtigung der Unterschätzung der eigentlichen Niederschlagsmenge durch Winddrift in Abhängigkeit der Jahreszeit. Im ersten Schritt der Skalierung erfolgt eine Berechnung der Monatssummen der mit MS-OK interpolierten Niederschlagsdaten. Im Anschluss wird für jeden Monat und jede Rasterzelle ein Skalierungsfaktor errechnet, mit dem die stündlich interpolierten Werte letztendlich multipliziert werden. Das Ausbreitungsmodell AUSTAL2000 bzw. AUSTAL2000N ist nur in der Lage Niederschlagszeitreihen mit einer Nachkommastelle zu verarbeiten, weshalb die skalierten Stundenwertinterpolationen hier gerundet werden müssen.

Abbildung 7 enthält die Abweichung des monatsweise skalierten Datensatzes von der aus den REGNIE-Monatswerten ermittelten Jahressumme. Durch die Rundung auf eine Nachkommastelle kommt es für einige Rasterpunkte zu minimalen Abweichungen, welche weitestgehend im Bereich zwischen + 0,4 % und - 0,4 % liegen. Nur für sehr wenige Punkte, welche im Boxplot als Ausreißer dargestellt sind, entstehen Abweichungen von maximal ca. 2% im Jahr 2008 und maximal ca. 1 % in den übrigen Jahren. Im Allgemeinen wird die Jahressumme des REGNIE-Datensatzes mit ausreichender Genauigkeit beibehalten.

Abbildung 7: Abweichung der Jahressumme des Niederschlags, hervorgerufen durch die Skalierung mit anschließender Rundung auf eine Nachkommastelle



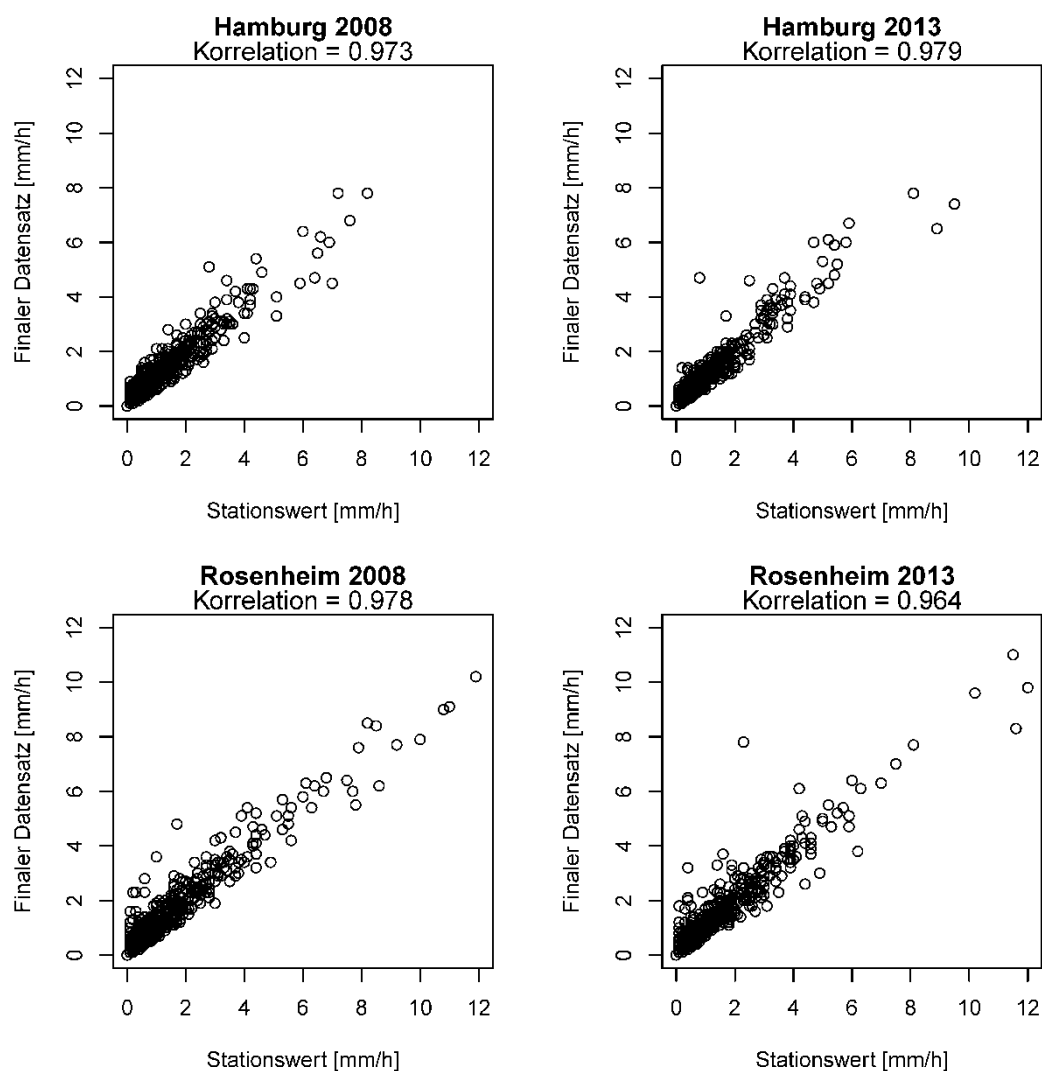
Quelle: Eigene Darstellung, Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft

5 Plausibilitätsprüfung

5.1 Korrelation mit Beobachtungsdaten

Eine erste Überprüfung der Plausibilität des finalen Datensatzes erfolgte ein Auslesen der Niederschläge für die Standorte von 16 ausgewählten Niederschlagsstationen: Berlin, Bremen, Chemnitz, Cottbus, Essen, Greifswald, Hamburg, Hannover, Bad Hersfeld, Leinefelde, Pfullendorf, Pirmasens, Rosenheim, Saarbrücken, Schleswig und Ummendorf. Es wurden jeweils zwei Zeiträume, die Jahre 2008 und 2013, ausgelesen, wobei die Option zur Skalierung der Niederschläge auf die ortsspezifische mittlere Jahressumme hierbei nicht gewählt wurde. Abbildung 8 zeigt den Vergleich der ausgelesenen Zeitreihen mit den korrespondierenden beobachteten Niederschlägen für die Standorte Hamburg und Rosenheim. In beiden Fällen wird jeweils für beide Jahre eine Korrelation von mindestens 0.964 zwischen Datenprodukt und Eingangsdaten erreicht.

Abbildung 8: Vergleich ausgelesener Zeitreihen mit korrespondierenden Stationsbeobachtungen für Hamburg im Jahre 2008 (oben links), Hamburg im Jahr 2013 (oben rechts), Rosenheim im Jahr 2008 (unten links) und Rosenheim im Jahr 2013 (unten rechts)



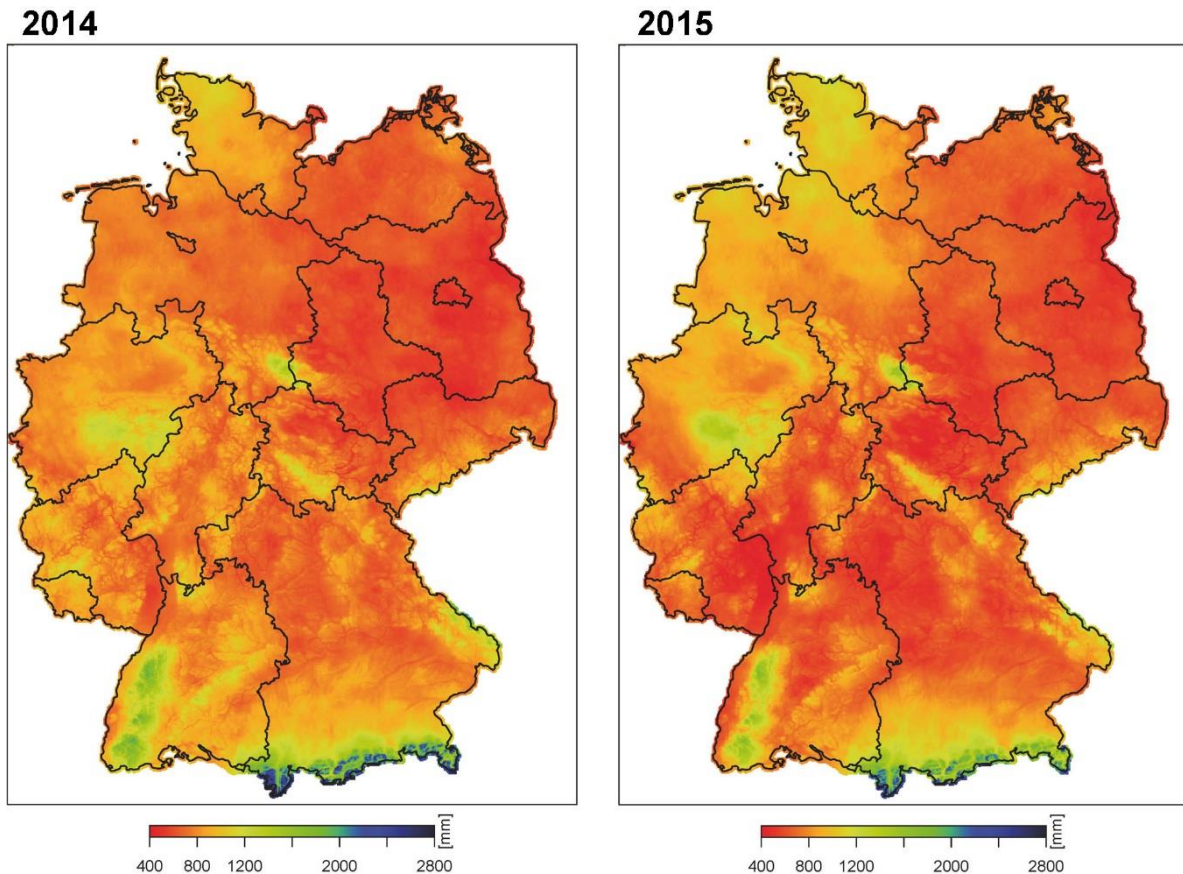
Quelle: Eigene Darstellung, Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft

Aufgrund der monatsweisen Skalierung auf REGNIE-Werte und der Gegebenheit, dass die Stationen sich im Allgemeinen nicht generell genau in der Mitte der interpolierten Rasterzelle befinden, kann keine perfekte Korrelation von 1,0 erreicht werden. Aus der guten Übereinstimmung lässt sich schließen, dass das Datenprodukt plausible Zeitreihen enthält, welche mit dem bereitgestellten R Skript ausgelesen werden können. Die weiteren Standorte, welche für diese Überprüfung herangezogen wurden, sind als Zahlenwerte in Anhang 9.3 zu finden. Für alle Standorte wird eine ähnlich gute Korrelation erzielt.

5.2 Jahresniederschlag

Die Stundenwertraster des finalen Datenprodukts wurden jährlich aufsummiert um die Plausibilität der räumlichen Niederschlagsverteilung zu prüfen. Abbildung 9 enthält jeweils eine Karte der Jahresniederschlagssumme für 2014 (links) und 2015 (rechts). Es ist ersichtlich, dass die räumliche Verteilung der Niederschläge im Allgemeinen den Erwartungen entspricht, d.h. es kommt in den Alpen sowie in den deutschen Mittelgebirgen zu höheren Niederschlagssummen als in den tiefergelegenen Gebieten. Bei der Darstellung der Jahressumme wurden feste Grenzen von 400 mm und 2800 mm für die Farbskala verwendet. Höhere Niederschlagsmengen könnten z. B. unter Umständen abgeschnitten und durch den gleichen Blauton repräsentiert werden. Die räumliche Verteilung des Niederschlags der übrigen Jahre ist in Anhang 9.4 zu finden. In allen Fällen kommt es zu einer plausiblen Verteilung, d. h. die Jahressumme folgt deutlich dem Muster der topographischen Höhe aus den REGNIE-Daten.

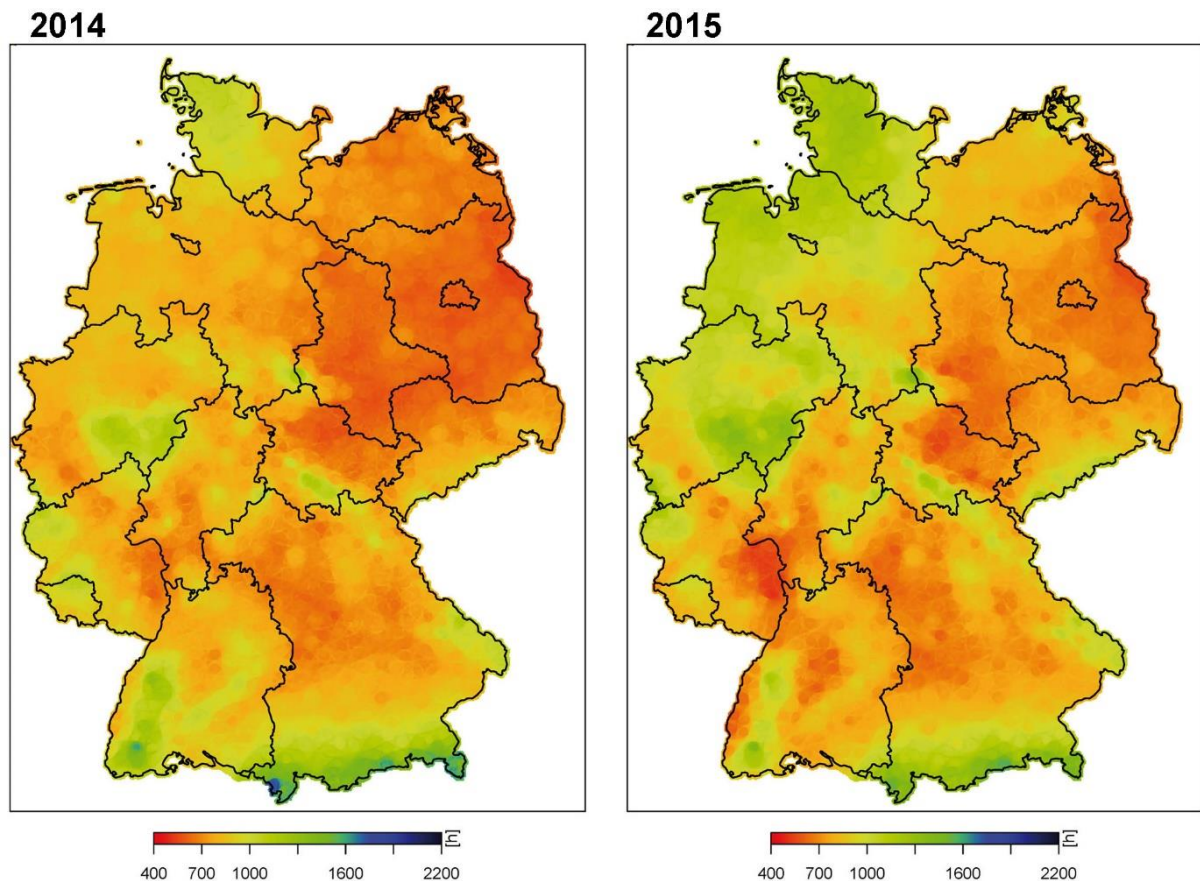
Abbildung 9: Niederschlagssumme des finalen Datenprodukts für das Jahr 2014 (links) und für das Jahr 2015 (rechts)



Quelle: Eigene Darstellung, Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft

In Abbildung 10 ist beispielhaft die räumliche Verteilung der Anzahl der Regenstunden für das Jahr 2014 (links) und 2015 (rechts) dargestellt. Es kommt auch hier zu einer realistischen Karte. Die Anzahl der Regenstunden ist im Allgemeinen in den bergigen Regionen höher als z. B. in der Norddeutschen Tiefebene. Die Karten der weiteren Jahre sind Anhang 9.5 zu entnehmen und weisen ebenfalls eine realistische Verteilung der Niederschlagshäufigkeit auf, welche ebenfalls der Topographie zu folgen scheint. Im Alpenraum sowie in den Mittelgebirgsregionen gibt es im Allgemeinen mehr Regentage als z. B. in Ostdeutschland und der Region zwischen Rheinland-Pfalz und Hessen (Rheingraben).

Abbildung 10: Anzahl der Regenstunden für das Jahr 2014 (links) und das Jahr 2015 (rechts)



Quelle: Eigene Darstellung, Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft

6 Bereitstellung der Daten

6.1 Datenformat und technische Voraussetzungen

Der finale Datensatz zur Bereitstellung von Niederschlagszeitreihen für die Ausbreitungsrechnung erfolgt im Network Common Data-Format (NetCDF) in der Version 4. Dieser offene Datenstandard findet im Allgemeinen eine weite Verbreitung bei der Speicherung und beim Austausch gerasterter Geodaten und es existieren Schnittstellen zu diversen Programmiersprachen. In der bereitgestellten Datei mit dem Dateinamen „restni_niederschlag_final.nc“ sind zwei Variablen vorhanden. Der stündliche Niederschlagsdatensatz ist in der Variable „Niederschlag“ abgespeichert, während die für die zusätzliche Skalierung benötigte mittlere Jahressumme des Niederschlags in der Variable „MittlererJahresniederschlag“ vorhanden ist. Mit den Dimensionen „xxxx“ und „yyyy“ kann auf den Rechtswert bzw. den Hochwert der Gauß-Krüger-Koordinaten in m im dritten Meridianstreifen zugegriffen werden, wobei die Koordinaten des Zellenmittelpunktes des 1 km x 1 km Rasters gespeichert sind. Die Dimension „time“ ist nur für die Variable „Niederschlag“ vorhanden und indexiert die einzelnen einstündigen Zeitschritte. Die Zeitangabe erfolgt in Sekunden nach dem 01.01.1970 um 00:00:00 Uhr und beziehen sich auf die koordinierte Weltzeit UTC. Die Niederschlagsangaben sind anfangsdatiert, d.h. ein Niederschlagsraster welches der Stunde 0:00 Uhr zugeordnet wird bezieht sich auf die Niederschlagssumme im Zeitraum 0:00 bis 01:00 Uhr. Tabelle 6-1 enthält eine Übersicht der Variablen und zugehörigen Dimensionen.

Tabelle 6-1: Überblick über die in der netCDF-Datei gespeicherten Variablen mit zugehörigen Dimensionen

Variable	Dimension	Minimum	Maximum	Schrittweite
MittlereJahressumme	yyyy [m]	5228500	6119500	1000
	xxxx [m]	3278500	3946500	1000
Niederschlag	yyyy [m]	5228500	6119500	1000
	xxxx [m]	3278500	3946500	1000
	Time [s]	1136073600 (1.1.2006 00:00)	1451602800 (31.12.2015 23:00)	3600 (1 h)

Hier wird ein Skript in der Programmiersprache R bereitgestellt welches für das Auslesen der Zeitreihen verwendet werden kann. Es benötigt die Angabe des auszulesenden Jahres und den Standort der geplanten Anlage als Eingangsinformationen und liefert als Ausgabe die Niederschlagszeitreihe in einem Format welches direkt von AUSTAL200N eingelesen werden kann. Das Skript wurde mit der R Version 3.4.0 (2017-04-21) erstellt, es sollten allerdings auch spätere Versionen zum Auslesen der Daten geeignet sein. Bei der Anwendung wird auf die Zusatzpakete „rgdal“ und „ncdf4“ zugegriffen, welche Routinen zur Umwandlung von Koordinaten und die Schnittstelle zum NetCDF4-Format liefern. Laut Handbuch erfordert AUSTAL200N die Angabe der stündlichen Niederschlagshöhe mit Enddatierung. Das Skript nimmt eine automatische Umrechnung vor, in dem der Datumsangabe eine Stunde bzw. 3600 s addiert werden. Die Koordinaten eines Anlagenstandorts können in den Projektionen UTM 32N, UTM 33N sowie in allen Meridianstreifen des Gauß-Krüger-Koordinatensystems angegeben werden. Zusätzlich ist eine Koordinatenangabe durch Längen- und Breitengrad (WGS 84) möglich.

Als Zusatzoption kann die Niederschlagszeitreihe auf den mittleren Jahresniederschlag der entsprechenden Rasterzelle skaliert werden. Ein Raster des mittleren Jahresniederschlags wurde aus den REGNIE-Monatswerten von Januar 2006 bis Dezember 2015 berechnet und in der Variable „MittlererJahresniederschlag“ gespeichert.

6.2 Anleitung zum Auslesen einer Zeitreihe

Um eine Niederschlagszeitreihe für einen bestimmten Standort bereitzustellen, muss das Skript mit einem Texteditor geöffnet werden. Dann können alle erforderlichen Angaben den entsprechenden Parametern am Anfang des Programmes zugeordnet werden.

Mit der Funktion „setwd()“ in Zeile 5 des Codes wird das Arbeitsverzeichnis festgelegt. Hier muss der Pfad angegeben werden, unter dem sowohl die NetCDF-Datei, als auch die Datei des mittleren Jahresniederschlags abgelegt sind. Die Ausgabedatei wird ebenfalls in das Arbeitsverzeichnis gespeichert. Das auszulesende Jahr muss der Variablen „jahr“ zugewiesen werden, während die Koordinaten des Anlagenstandorts der Variablen „ort“ zugewiesen werden müssen. Der Variablen „proj“ muss eine bestimmte Zeichenkette zugewiesen werden, mit der das Koordinatensystem spezifiziert wird. Tabelle 6-2 enthält alle Zeichenketten, mit der die Angabe des Koordinatensystems erfolgen kann. Das Skript verwendet intern EPSG-Codes, mit der die Koordinatensysteme identifiziert werden können. Diese eindeutigen Schlüsselnummern für geodätische Datensätze (siehe: www.epsg.org) werden für die Transformation der Koordinaten mit den Routinen des „rgdal“ R-Pakets benötigt.

Falls eine Skalierung auf den mittleren Jahresniederschlag durchgeführt werden soll, muss der Variablen „skalierung“ der logische Wert T (True) zugewiesen werden. Andernfalls muss eine Angabe von F (False) erfolgen. Der Name der Ausgabedatei, welche im Arbeitsverzeichnis erstellt wird, muss unter „ausgabadat“ angegeben werden.

Wenn das Skript ausgeführt wird erfolgt eine automatische Identifikation der auszulesenden Rasterzelle aus den Koordinatenangaben. Der Index der ersten Stunde des Jahres sowie die Anzahl der auszulesenden Stundenzeitschritte werden aus der Jahresangabe ermittelt, sodass die Zeitreihe unter dem angegebenen Namen im Arbeitsverzeichnis bereitgestellt werden kann. Das Auslesen einer Zeitreihe sollte, in Abhängigkeit der Rechnerleistung, nur wenige Sekunden dauern, da die Blockgrößen der NetCDF-Datei (siehe in Pierce (2017) unter dem Befehl „ncvar_def“, Attribut „chunksizes“) für das schnelle Auslesen von Einzelzeitreihen angepasst wurden.

Tabelle 6-2: Angabe des Koordinatensystems beim Auslesen der Niederschlagszeitreihen

Koordinatensystem	Zeichenkette	EPSG-Code
Gauß-Krüger-Koordinaten, 2. Meridianstreifen	"DHDN2"	31466
Gauß-Krüger-Koordinaten, 3. Meridianstreifen	"DHDN3"	31467
Gauß-Krüger-Koordinaten, 4. Meridianstreifen	"DHDN4"	31468
UTM-Koordinaten, Zone 32	"UTM32N"	25832
UTM-Koordinaten, Zone 33	"UTM33N"	25833
Koordinaten in Längen- und Breitengrad	"WGS84"	Nicht erforderlich

7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Im Rahmen dieses Projekts erfolgte die Erstellung eines gesamtdeutschen Niederschlagsdatensatzes für die Berücksichtigung der nassen Deposition bei der Ausbreitungsrechnung von Luftschadstoffen. Als Methodik wurde eine geostatistische Interpolation mit MS-OK mit einer anschließenden Skalierung auf die monatliche Niederschlagshöhe des REGNIE-Datensatzes des DWD implementiert. Dieses Verfahren wurde in einem Pilotprojekt entwickelt und für die Region Niedersachsen validiert. Die hier durchgeführten Arbeitsschritte umfassten die Anpassung des Verfahrens für das Gesamtgebiet der Bundesrepublik Deutschlands, die Aufbereitung und Prüfung von ca. 1000 Niederschlagszeitreihen, die Aufbereitung der REGNIE-Daten, sowie die eigentliche Interpolation mit der anschließenden Skalierung.

Das erzeugte Datenprodukt wurde auf Plausibilität geprüft. Mit einem R-Skript, welches ebenfalls im Rahmen dieses Projektes entwickelt wurde, kann für jeden beliebigen Anlagenstandort innerhalb Deutschlands und jedes beliebige Jahr im Zeitraum von 2006 bis 2015 eine Niederschlagszeitreihe ausgelesen werden. Zusammen mit einer vorhandenen AKTerm ermöglicht dies eine Berechnung von Schadstoffeinträgen unter Berücksichtigung der nassen Deposition. Die Nutzung einer Ausbreitungsklassenstatistik (AKS) in Verbindung mit diesem Datenprodukt ist nicht vorgesehen.

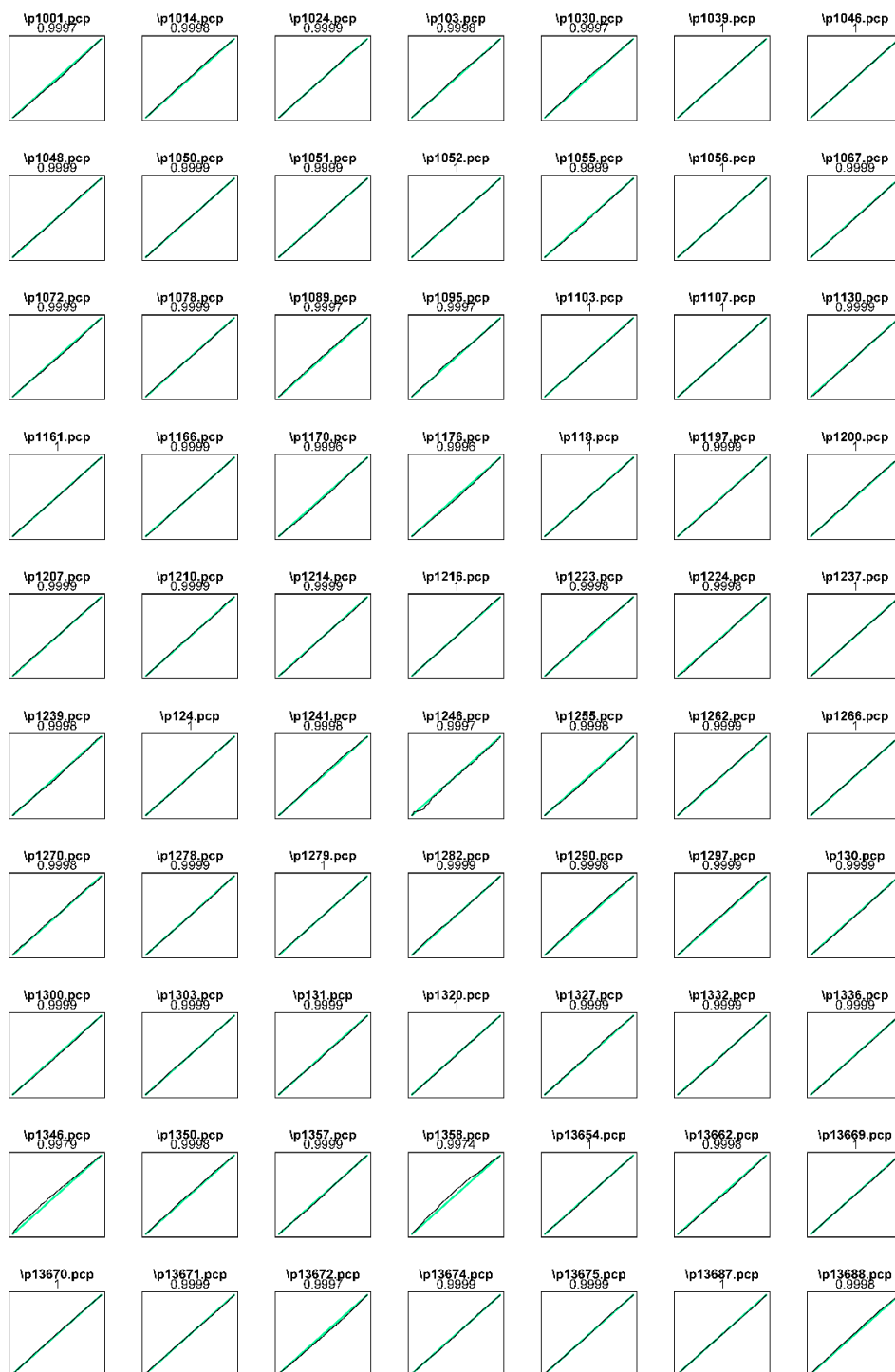
8 Quellenverzeichnis

- Akin, H., Siemes, H., 1988. Praktische Geostatistik - Eine Einführung für den Bergbau und die Geowissenschaften. Springer, Berlin.
- BMU, 2002. Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft - TA Luft, Bundesministerium für Naturschutz und Reaktorsicherheit, GMBL. 2002, Heft 25-29, 511-605.
- Deutsch, C.V., Journel, A.G., 1992. GSLIB: Geostatistical software library and user's guide. Oxford University Press.
- Deutscher Wetterdienst (2013), REGNIE: Regionalisierte Niederschläge, Verfahrensbeschreibung und Nutzeranleitung, Deutscher Wetterdienst, Abteilung Hydrometeorologie, Offenbach.
- Goovaerts, P., 2000. Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. J. Hydrol. 228, 113–129.
- Goovaerts, P., 1997. Geostatistics for natural resources evaluation. Oxford University Press, New York.
- Haberlandt, U., 2007. Geostatistical interpolation of hourly precipitation from rain gauges and radar for a large-scale extreme rainfall event. J. Hydrol. 332, 144–157.
- Pierce, D., 2017. R-Package "ncdf4." Verfügbar unter: <https://CRAN.R-project.org/package=ncdf4>.
- Rauthe, M., Steiner, H., Riediger, U., Mazurkiewicz, A., Gratzki, A., 2013. A Central European precipitation climatology – Part I: Generation and validation of a high-resolution gridded daily data set (HYRAS). Meteorol. Z. 22, 235–256.
- Richter, D., 1995. Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Meßfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers, Berichte des Deutschen Wetterdienstes. Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main.
- Umweltbundesamt (Hrsg.), 2014. Regionalisierung stündlicher Niederschläge zur Modellierung der nassen Deposition - Abschlussbericht. Dessau-Roßlau.
- Verworn, A., Haberlandt, U., 2011. Spatial interpolation of hourly rainfall – effect of additional information, variogram inference and storm properties. Hydrol. Earth Syst. Sci. 15, 569–584.

9 Anhang

9.1 Ergebnisse der Doppelsummenanalyse

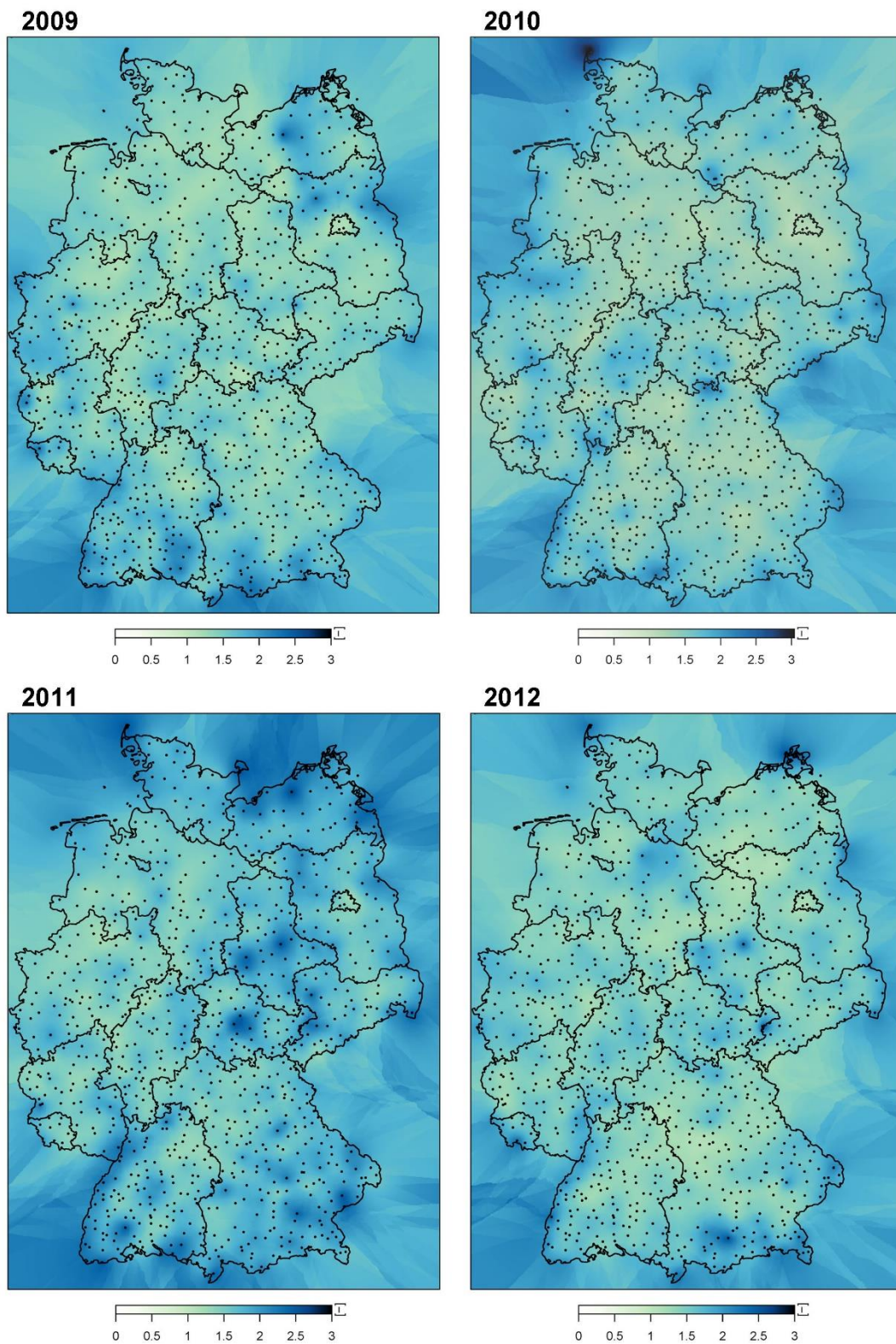
Abbildung 11: Ausgewählte Ergebnisse der Doppelsummenanalyse: Auf der x-Achse ist die kumulierte Referenzzeitreihe und auf der y-Achse die kumulierte Testzeitreihe aufgetragen (schwarz). Die grüne Diagonale repräsentiert den optimalen Fall.



Quelle: Eigene Darstellung, Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft

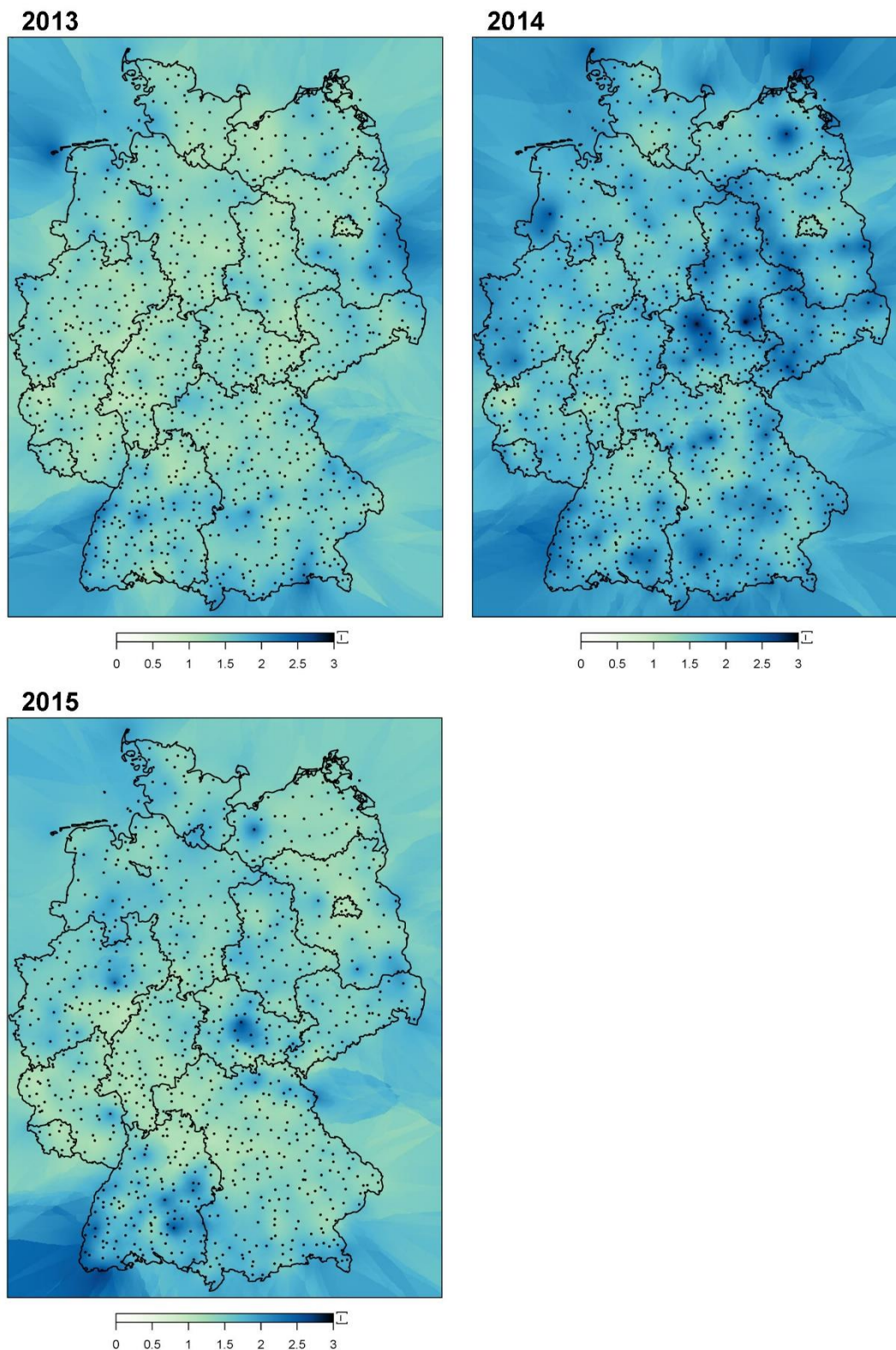
9.2 Räumliche Karten des Interpolationsfehlers

Abbildung 12: Räumliche Verteilung des RMSE-Interpolationsfehlers (Gl. 14) für die Jahre 2009 (oben links), 2010 (oben rechts), 2011 (unten links) und 2012 (unten rechts).



Quelle: Eigene Darstellung, Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft

Abbildung 13: Räumliche Verteilung des Interpolationsfehlers für die Jahre 2013 (oben links), 2014 (oben rechts) und 2015 (unten links).



Quelle: Eigene Darstellung, Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft

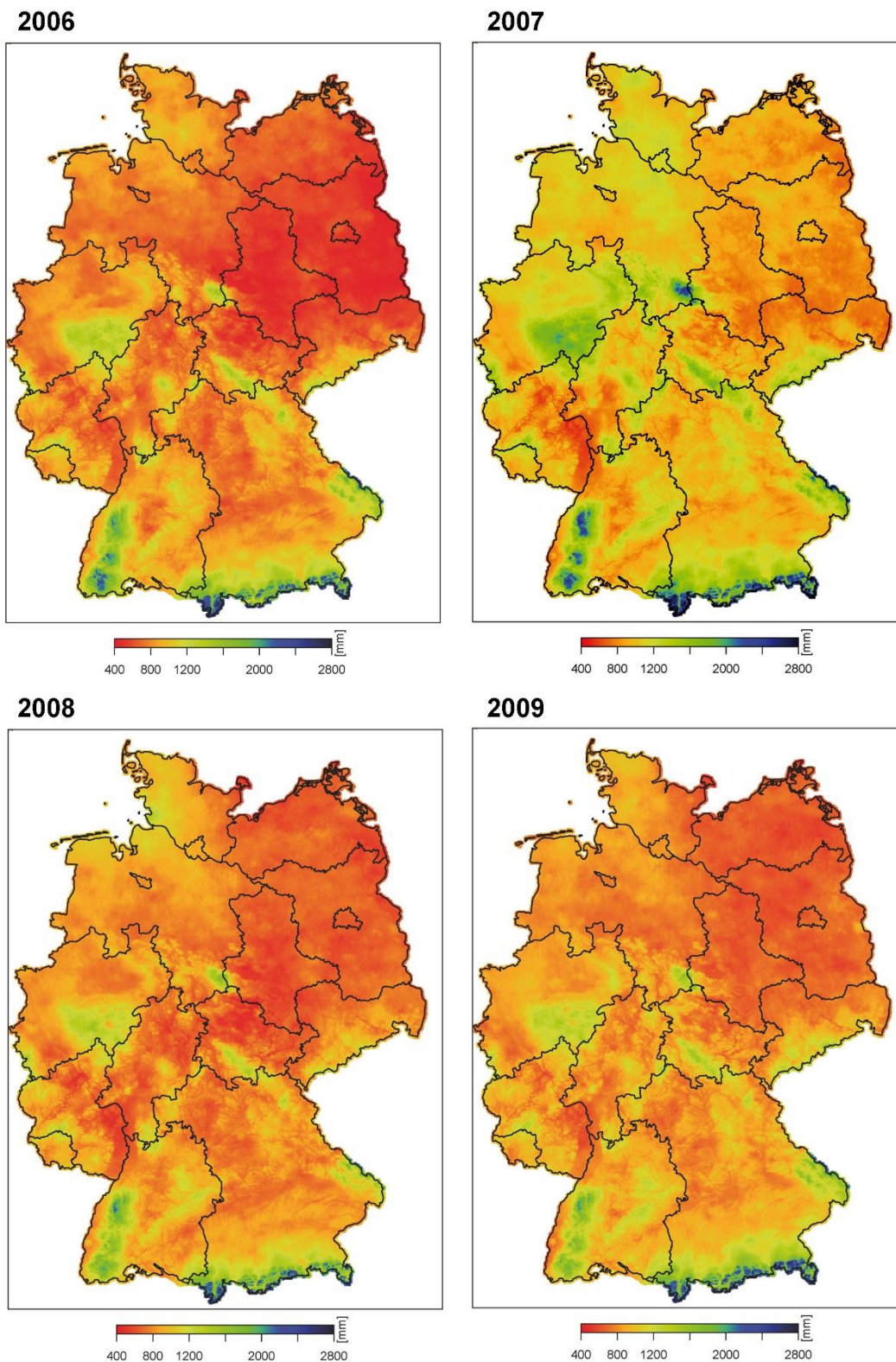
9.3 Korrelation ausgelesener Niederschlagszeitreihen mit Beobachtungsdaten

Tabelle 9-1: Korrelation ausgelesener Zeitreihen des Niederschlags mit entsprechenden Beobachtungsdaten

Station	Jahr	Korrelation [-]	Station	Jahr	Korrelation [-]
Berlin	2008	0.960	Bad Hersfeld	2008	0.980
	2013	0.970		2013	0.965
Bremen	2008	0.978	Leinefelde	2008	0.955
	2013	0.988		2013	0.963
Chemnitz	2008	0.968	Pfullendorf	2008	0.966
	2013	0.978		2013	0.972
Cottbus	2008	0.983	Pirmasens	2008	0.980
	2013	0.980		2013	0.972
Essen	2008	0.980	Rosenheim	2008	0.978
	2013	0.962		2013	0.964
Greifswald	2008	0.978	Saarbrücken	2008	0.963
	2013	0.974		2013	0.976
Hamburg	2008	0.973	Schleswig	2008	0.979
	2013	0.979		2013	0.978
Hannover	2008	0.951	Ummendorf	2008	0.977
	2013	0.973		2013	0.980

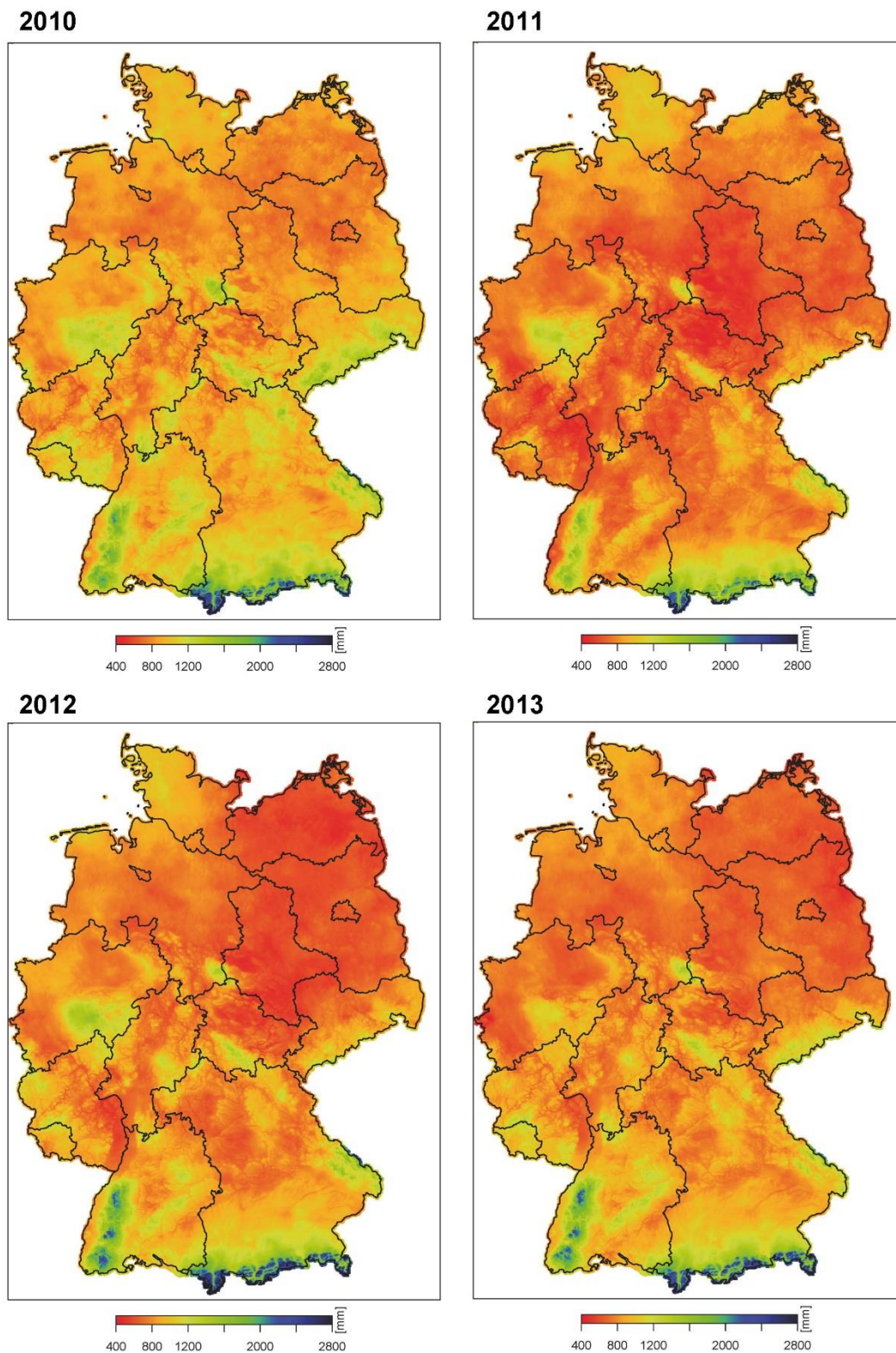
9.4 Räumliche Karten der Jahressumme

Abbildung 14: Räumliche Verteilung der Jahressumme des finalen Datenprodukts für die Jahre 2006 (oben links), 2007 (oben rechts), 2008 (unten links), und 2009 (unten rechts).



Quelle: Eigene Darstellung, Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft

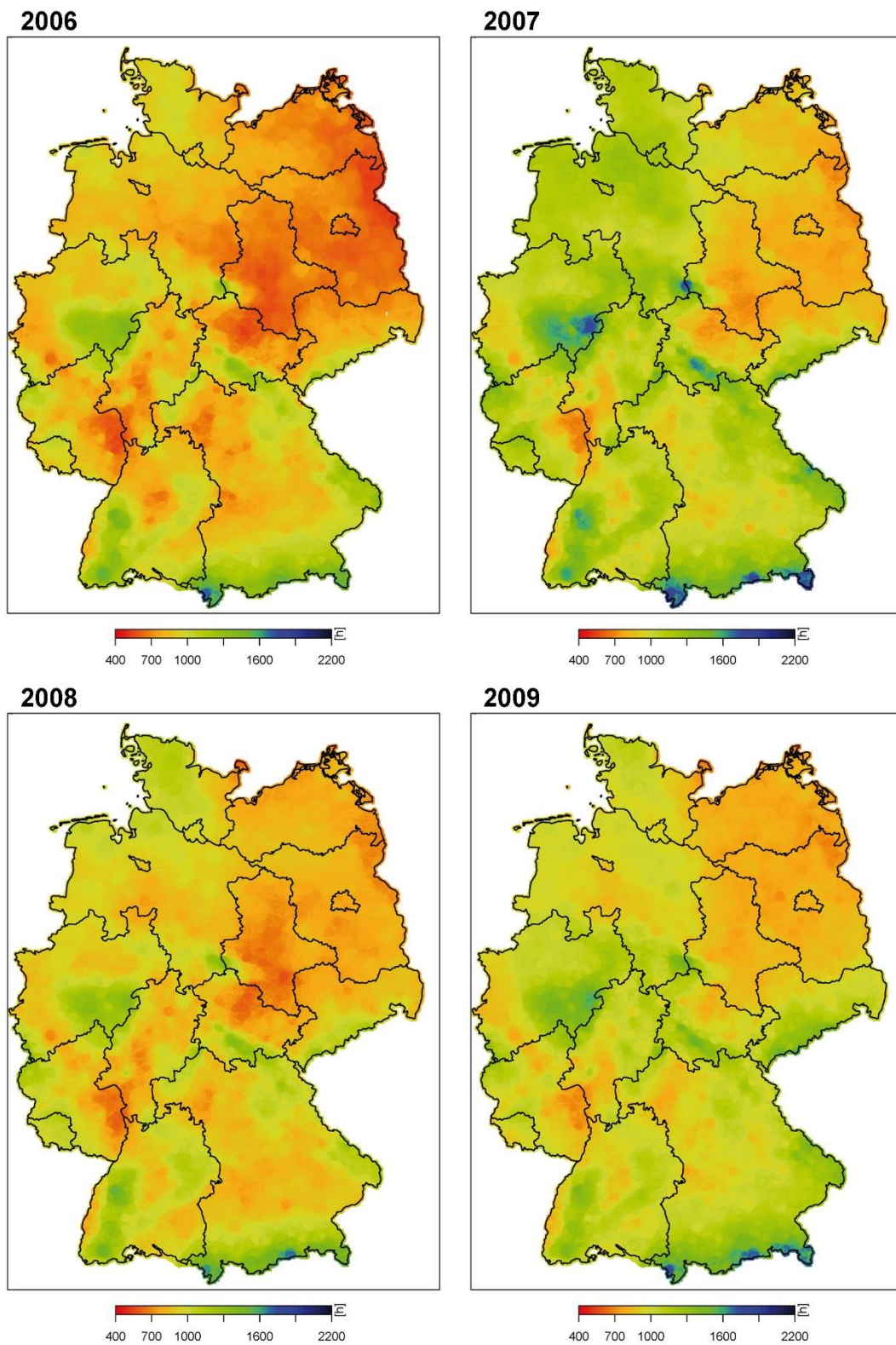
Abbildung 15: Räumliche Verteilung der Jahressumme des finalen Datenprodukts für die Jahre 2010 (oben links), 2011 (oben rechts), 2012 (unten links), und 2013 (unten rechts).



Quelle: Eigene Darstellung, Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft

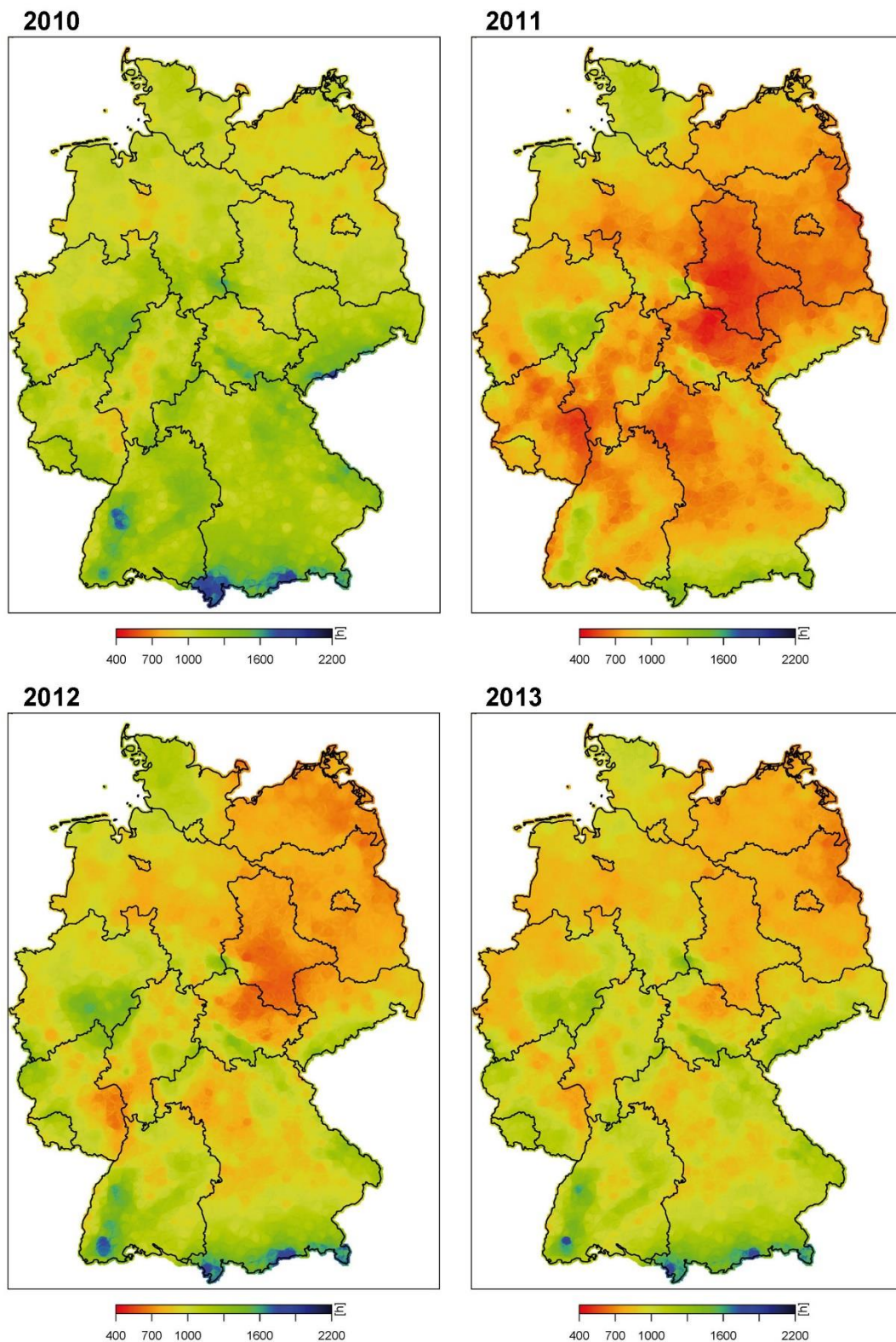
9.5 Räumliche Karten der Anzahl der Regentage

Abbildung 16: Räumliche Verteilung der Anzahl der Regentage des finalen Datenprodukts für die Jahre 2006 (oben links), 2007 (oben rechts), 2008 (unten links), und 2009 (unten rechts).



Quelle: Eigene Darstellung, Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft

Abbildung 17: Räumliche Verteilung der Anzahl der Regentage des finalen Datenprodukts für die Jahre 2010 (oben links), 2011 (oben rechts), 2012 (unten links), und 2013 (unten rechts).



Quelle: Eigene Darstellung, Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft