

IMPLEMENTIERUNG EINES GIS-WERKZEUGS ZUR AUTOMATISIERTEN BERECHNUNG DES WEATHER EXTREMITY INDEX

Thorsten Kelm, Ulrike Klein, Fabian Netzel, Christoph Mudersbach, Marc Krüger, Angela Pfister

Zusammenfassung: Zur Bewertung von Starkregenereignissen liegen diverse Vorschläge für einen Starkregenindex vor. Der Weather Extremity Index (WEI) beschreibt die Extremität von Niederschlagsereignissen über die Intensität und zusätzlich durch die räumliche und zeitliche Komponente. Auf der Grundlage des Geoinformationssystems ArcGIS wurde ein Werkzeug zur automatisierten Auswertung entwickelt. Als Datengrundlage wurden die hoch aufgelösten Niederschlagsdaten von neun langjährigen terrestrischen Messstationen der Emschergerossenschaft und des Lippeverbands (EG/LV) eingesetzt. Anhand der akkumulierten Regenhöhen h_N und Dauerstufen D konnten diese entsprechend durch statistische Wiederkehrzeiten T_n beschrieben werden. Mittels des gewählten Interpolationsverfahrens Inverse Distance Weighting (IDW) wurden die punktuell vorliegenden Wiederkehrzeiten auf das Untersuchungsgebiet übertragen und bilden somit die Ausgangsdaten für die Bestimmung des Weather Extremity Index.

Schlüsselwörter: Weather Extremity Index, Starkregenindex, ArcGIS, Inverse Distance Weighting

IMPLEMENTATION OF A GIS TOOL FOR AUTOMATED CALCULATION OF THE WEATHER EXTREMITY INDEX

Summary: Various heavy rainfall indices are currently used to evaluate heavy rainfall events. The Weather Extremity Index (WEI) describes the extremity of precipitation events over intensity and additionally through the spatial and temporal component. Based on the ArcGIS geoinformation system, a tool for automated evaluation was developed. The high-resolution precipitation data from nine long-term terrestrial rain gauges, operated by the Emschergerossenschaft and the Lippeverband (EG/LV), were used as a basis for the data analysis. Based on the accumulated rainfall amounts h_N and durations of precipitation D , these could be described by statistical recurrence intervals T_n . By means of the chosen interpolation method Inverse Distance Weighting (IDW), the selective available recurrence intervals were transferred to the study area and thus form the starting data for the determination of the Weather Extremity Index.

Keywords: Weather Extremity Index, heavy rainfall index, ArcGIS, Inverse Distance Weighting

Autoren

M. Eng. Thorsten Kelm
Prof. Dr. rer. nat. Ulrike Klein
Hochschule Bochum
Fachbereich Geodäsie
Lennershofstraße 140
D-44801 Bochum
E: thorsten.kelm@hs-bochum.de
ulrike.klein@hs-bochum.de

M. Sc. Fabian Netzel
Prof. Dr.-Ing. Christoph Mudersbach
Hochschule Bochum
Fachbereich Bauingenieurwesen
Lennershofstraße 140
D-44801 Bochum
E: fabian.netzel@hs-bochum.de
christoph.mudersbach@hs-bochum.de

Dipl.-Ing. Marc Krüger, M. Sc.
Dipl.-Geogr. Angela Pfister
Emschergerossenschaft/Lippeverband
Kronprinzenstraße 24
D-45128 Essen
E: krueger.marc@eglv.de
pfister.angela@eglv.de

1 EINLEITUNG

Durch die in den letzten Jahren immer häufiger vorkommenden extremen Wetterereignisse und die mediale Berichterstattung sowie die direkte und schnelle Verbreitung privater Fotos und Videos in den sozialen Medien rücken Unwetterereignisse immer weiter in den Fokus der Öffentlichkeit. Präsenzte Meldungen über den fortschreitenden Klimawandel unterstreichen diesen Aspekt. Permanent wird über schwere Unwetter, Hochwasser und wochenlange Trockenphasen berichtet.

Besonders schwerwiegende Auswirkungen hatte eine Unwetterserie zwischen Ende Mai und Anfang August 2016, bei der verschiedene Regionen in Süddeutschland, Thüringen, Sachsen und Nordrhein-Westfalen von heftigen Sturmböen, Hagelschauern, Starkregen, Überschwemmungen und Erdrutschen betroffen waren. Außergewöhnlich schwer traf es insbesondere den Ort Braunsbach im Norden Baden-Württembergs am 29. Mai 2016. Innerhalb von weniger als zwei Stunden fielen mehr als 100 mm Niederschlag. Die Ursache hierfür waren hochintensive konvektive Starkniederschlagsereignisse mit verstärkter Gewitterzellenbildung, induziert durch eine über sechs Tage andauernde Großwetterlage „Tief Mitteleuropa (TM)“. Als Folge entstand eine verheerende Sturzflut, die mit einer besonders kurzen Reaktionszeit von weniger als sechs Stunden zu hohen Fließgeschwindigkeiten des betreffenden Gewässers und somit zu einem extremen Hochwasser führte. Wasserstände über der Geländeoberfläche von bis zu 3,5 m sowie mitgeführtes Geröll, Schwemmholz und Ähnliches verursachten starke Beschädigungen an Häusern, Fundamente wurden unterspült, Fenster und Türen eingedrückt und Keller liefen mit Schlamm voll (Bronstert et al. 2017, Vogel et al. 2017).

Ein anderes Unwetterereignis ereignete sich Ende Juli 2014 in der Stadt Münster. Innerhalb von sieben Stunden wurden etwa 292 mm Niederschlag registriert, sodass die langjährige mittlere Monatsniederschlagssumme von 65 bis 75 mm im Juli in diesem Gebiet etwa um das Vierfache übertroffen wurde (Grüning & Grimm 2015). Bedingt durch die hohe Intensität und räumliche Ausdehnung des Unwetters wurde im gesamten Stadtgebiet Münster infolge dieses Starkregens eine Sturzflut hervorgerufen, die zahlreiche Straßen, Unter-

führungen, tausende Kellerräume und ganze Erdgeschosse überflutete. Nach Angaben des LANUV NRW (2014) zählte damit das Münster-Ereignis von 2014 zu einem der höchsten jemals in Deutschland gemessenen Werte. Der bisherige Rekordwert der Tagesniederschlagssumme wurde mit 312 mm in Zinnwald-Georgenfeld (Erzgebirge) im August 2002 gemessen. In Verbindung mit einer über acht Tage andauernden Großwetterlage „Trog Mitteleuropa (TRM)“ und der damit verbundenen „Vb-Zugstraße“ entstanden flächendeckende, extreme und großräumige Gebietsniederschläge u.a. im Elbegebiet. Als Resultat dieser extremen Niederschlagsverhältnisse prägte sich eine außergewöhnliche Hochwassersituation aus, die zum katastrophalen Hochwasser 2002 führte (DKKV 2003).

Bei der Beschreibung von Extremereignissen werden Niederschläge nicht allein durch die Menge des Niederschlags, sondern zusätzlich durch die Abhängigkeit des Zeitraums, in dem dieser gefallen ist, klassifiziert. Dementsprechend kann ein extremes Niederschlagsereignis sowohl von kurzer Dauer mit hoher Intensität sein als auch über mehrere Stunden oder Tage andauernde Niederschläge mit geringen Niederschlagsmengen mit sich bringen. Als Maß der Intensität von Niederschlägen wird die Menge der Niederschlagshöhe in Liter pro Quadratmeter [l/m^2] bzw. in Millimetern [mm] angegeben (Patt & Jüpner 2013).

Eine erste Definition von extremen Niederschlägen kann über einen Schwellenwert oder das Perzentil-Verfahren erfolgen (She et al. 2015, Maniak 2010). Hierbei wird eine Einteilung ausschließlich aufgrund der Intensität bzw. der Häufigkeit des Auftretens vorgenommen. Die Eintrittswahrscheinlichkeit lässt sich als statistisches Wiederkehrintervall T_n beschreiben und kann auf Grundlage von extremwertstatistischen Analysen nach dem DWA-Arbeitsblatt A 531 bestimmt werden (DWA 2012). Diese lässt sich im statistischen Mittel als Zeitspanne der Länge von n Jahren, in der ein Ereignis einen Wert einmal erreicht oder überschreitet, definieren (Maniak 2010, DIN 4049-3 1992). Für eine transparente und verständliche Risikokommunikation gegenüber der Öffentlichkeit ist die Vermittlung von ausschließlich statistischen Wiederkehrzeiten allerdings nicht zielführend. Beispielsweise wird von der

Öffentlichkeit somit aus der Bezeichnung $T_n = 100$ a bzw. „Jahrhundertereignis“ fälschlicherweise oft abgeleitet, dass ein Ereignis mit diesem Ausmaß erst in 100 Jahren erneut eintritt. Aus statistischer Sicht wird damit aber die Schwere und nicht der Zeitraum ausgedrückt. Daher ist diese Methodik für die Allgemeinheit nicht bzw. nur schwer nachvollziehbar. Stattdessen wird seit einigen Jahren versucht, die Schwere von Ereignissen durch einen Index anhand einer definierten Skala zu beschreiben. Aktuelle Ansätze zur Charakterisierung von Starkregenindizes nach Grisa (2013), Schmitt (2014, 2015), Krüger & Pfister (2016) und Mudersbach (2016) überführen die Wiederkehrzeiten und Dauerstufen über mathematische Berechnungen in einen Index mit einem festgelegten Wertebereich sowie einer verbalen Beschreibung analog zu der von Erdbeben oder Windstärken. Die räumliche Komponente wird bei der Untersuchung von Extremniederschlägen auf Basis von Indizes allerdings noch nicht berücksichtigt.

Die Faktoren Zeit und Raum spielen jedoch bei der Charakterisierung von extremen Ereignissen, wie z. B. Starkregen, ebenfalls eine wichtige Rolle. Für genau diese Beschreibung eines Ereignisses entwickelten Müller & Kaspar (2014) die Methodik des Weather Extremity Index (WEI). Dieses Verfahren kann grundsätzlich auch auf weitere Arten von Wetter- und Klimaextremen, wie z. B. Hitzewellen und Unwetter, unter der Verwendung von geeigneten meteorologischen Daten (Niederschlagshöhen, Temperaturen usw.) angewendet werden (Müller & Kaspar 2014). Anhand des WEI wird die Extremität bzw. das Ausmaß durch die Berücksichtigung der Seltenheit, über die interpolierten statistischen Wiederkehrzeiten und deren räumliche Ausdehnung und ihre zeitliche Dauer, beschrieben. Die Anwendung ist jedoch noch wenig erforscht und bedarf weiteren Untersuchungen (Mudersbach et al. 2017). Ein erster Verfahrensschritt im Rahmen der Masterarbeit von Kelm (2017) in Kooperation mit Emschergenossenschaft und Lippeverband (EG/LV) bestand somit darin, den WEI automatisiert mithilfe eines Geoinformationssystems (GIS) zu ermitteln. Als Fallbeispiel wurde hierzu das Stadtgebiet von Dortmund in Nordrhein-Westfalen, das zum Großteil innerhalb der Verbandsgrenzen von EG/LV liegt, ausgewählt. Dieses

Stadtgebiet eignet sich zum einen aufgrund einer guten Datengrundlage und zum anderen durch die in der Vergangenheit zahlreichen schweren Unwetterereignisse, die im Zuge der Untersuchungen durch den WEI beschrieben werden können.

2 DATENGRUNDLAGE

Zur Beobachtung von meteorologischen Daten werden in Deutschland etwa 6.500 Niederschlagsmessstationen u. a. vom Deutschen Wetterdienst (DWD) und vielen andern Partnern betrieben (Maniak 2010). In der Emscher-Lippe-Region (ELR) betreibt EG/LV zurzeit ein Hauptmessnetz von 74 Niederschlagsstationen. Von diesen Stationen werden 45 langjährige und lückenbereinigte Niederschlagszeitreihen mit Zeitreihenlängen von teilweise mehr als 80 Jahren fortgeschrieben (Krüger & Pfister 2016). An diesen terrestrischen Niederschlagsstationen wird die Niederschlagshöhe mit einer zeitlichen Auflösung von einer Minute gemessen. Diese Datenreihen ermöglichen über die Extremwertstatistik nach DWA (2012) eine ortsbezogene Aus-

sage zu den Wiederkehrzeiten. Das Arbeitsblatt DWA A-531 definiert 21 Dauerstufen D von fünf Minuten bis sechs Tagen und Wiederkehrzeiten T_n von ein bis 100 Jahren (DWA 2012). Die Ermittlung von Starkregen in Abhängigkeit von Dauerstufen und Wiederkehrzeiten basiert auf der Eintrittswahrscheinlichkeit von Niederschlagsereignissen. Die aufgezeichneten langjährigen Zeitreihen der terrestrischen Niederschlagsstationen stellen dabei Stichproben aus der Grundgesamtheit aller aufgetretenen Niederschläge dar, wobei aus den Parametern der Stichprobe mit geeigneten Verteilungsfunktionen auf die Grundgesamtheit geschlossen werden kann und Regenhöhen mit einer statistischen Eintrittswahrscheinlichkeit bzw. Wiederkehrzeit über Extrapolationen bestimmt werden können. In der Masterarbeit von Kelm (2017) wurden die Niederschlagszeitreihen von neun terrestrischen Niederschlagsmessstationen im Stadtgebiet von Dortmund und angrenzender Umgebung eingesetzt, die als aufbereiteter Datensatz von EG/LV zur Verfügung gestellt wurden.

3 METHODIK DES WEATHER EXTREMITY INDEX (WEI)

Zur Beschreibung von Starkregenereignissen kommt deren Lage im Raum und damit einhergehend dem zeitlichen Verlauf des Niederschlags eine große Bedeutung zu. Die bisher mit den eingesetzten Verfahren durchgeführten Analysen geben keinen Überblick über die räumliche Verteilung eines Niederschlagsereignisses. Es werden ausschließlich Auswertungen pro Bodenstation durchgeführt. Die Kombination von mehreren Stationen ist mit den bisherigen Verfahren nicht möglich. Der von Müller & Kaspar (2014) entwickelte WEI beinhaltet hingegen einen ortsbezogenen Ansatz zur Beschreibung der Schwere von Wetter- und Klimaextremen, der neben der Intensität auch die räumliche und zeitliche Komponente berücksichtigt. Nach Müller & Kaspar (2014) stehen die Intensität und die räumliche Ausdehnung in einem direkten Verhältnis. Demnach lässt sich ein extremes Wetterereignis dadurch beschreiben, dass es selten auftritt (zeitliche Komponente) und eine große Ausdehnung besitzt (räumliche Komponente) (Müller & Kaspar 2014).

Die Methodik zur Ermittlung des WEI gliedert sich in drei Arbeitsschritte. Zunächst werden die Wiederkehrzeiten T_n für die Bodenstationen für einen Zeitschritt t bestimmt. Im zweiten Schritt werden die Werte räumlich interpoliert und im dritten Schritt die Berechnung des WEI durchgeführt.

Zur Ableitung der statistischen Wiederkehrzeiten T_n werden die Regenhöhen h_n aus den Niederschlagsmessungen der langjährigen terrestrischen Niederschlagsstationen für das zu untersuchende Zeitfenster ermittelt. Diese Werte bilden die Basis für eine räumliche Interpolation, bei der die ortsbezogenen statistischen Wiederkehrzeiten auf ein Untersuchungsgebiet übertragen werden. Die Grundlage der Berechnung bildet das in Abbildung 1 dargestellte Polygon-Rastergitter, welches das gesamte zu untersuchende Gebiet überdeckt. Die Rasterweite wurde empirisch auf 250 Meter festgelegt und die Kanten der Polygone an das Koordinatengitter des Bezugssystems ETRS89/UTM auf ganze Kilometer orientiert.

Im zweiten Schritt der Berechnung des WEI werden die Wiederkehrzeiten der einzelnen terrestrischen Niederschlagssta-

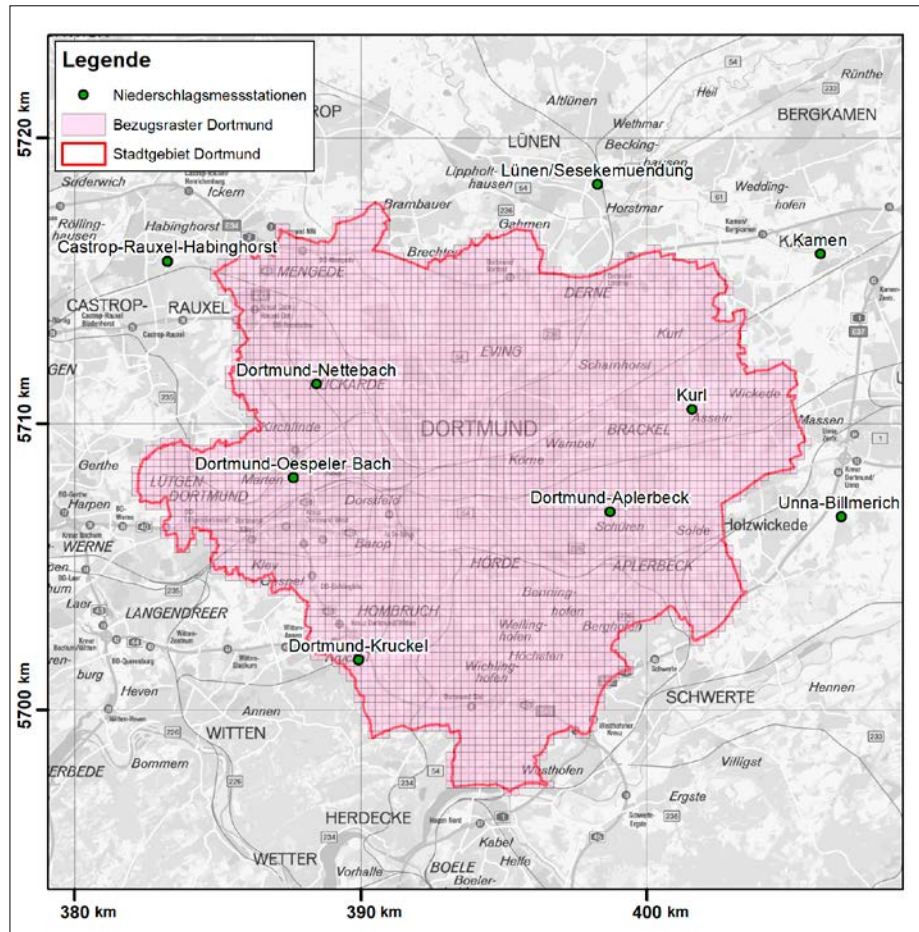


Abbildung 1: Bezugsraster für das Untersuchungsgebiet der Stadt Dortmund (Datenquellen: EG/LV (2017), Regionalverband Ruhr, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie)

onen wegen der exponentiellen Natur der Extremwertverteilung, zunächst mit dem dekadischen Logarithmus transformiert und danach mit einem geeigneten linearen Interpolationsverfahren auf das in Abbildung 1 dargestellte regelmäßige Rastergitter übertragen. Anschließend werden die resultierenden flächendeckenden Werte über die Exponentialfunktion als Umkehrfunktion zurücktransformiert. Abschließend kann auf der Grundlage der interpolierten Rasterwerte die räumliche und zeitliche Extremität des Wetterereignisses bestimmt werden. Die Seltenheit eines Ereignisses [$\log(a)$] wird über das räumliche geometrische Mittel abgebildet, das sich über die Gleichung 1 als Mittelwert der logarithmierten Wiederkehrzeiten berechnen lässt. Dabei repräsentiert $N[a]$ die Wiederkehrzeit T_n der untersuchten Niederschlagssumme in einem Rasterpunkt i zu einem Zeitpunkt t , wobei die Variable n die Anzahl der zu betrachtenden Rasterzellen beschreibt.

$$\log(G_{ia}) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \log(N_{ii}) \quad (1)$$

Die räumliche Ausdehnung wird als weiterer Parameter des zu untersuchenden Ereignisses über die Anzahl der zu betrachtenden Rasterzellen bestimmt. Da das logarithmische geometrische Mittel bedeutend schneller abnimmt als die Fläche zunimmt und demnach das Produkt der beiden Parameter kontinuierlich steigt, ist es notwendig, die räumliche Ausdehnung gewichtet einzubringen (Müller & Kaspar 2014). Daher wird die Fläche radiziert, indem diese über die Kantenlänge in die Berechnung einfließt. Der theoretische Radius R [km] des betroffenen Gebiets wird, wie in Gleichung 2 beschrieben, über die Fläche a [km²] abgeleitet, welche sich aus der Anzahl der Rasterzellen ergibt.

$$R = \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{\pi}} \quad (2)$$

Die Schwere eines Ereignisses lässt sich durch den funktionalen Zusammenhang des Produkts E_{ia} [$\log(a)$ km] beschreiben. Es ergibt sich als Produkt aus dem logarithmischen geometrischen Mittel der Wiederkehrzeiten und dem Radius der zugehörigen Fläche (Gleichung 3). Demzufolge ergibt der E_{ia} -Wert mit der signifikanten Zu-

nahme der Fläche zunächst an und fällt schließlich mit fortlaufender Einbeziehung rangniedriger Wiederkehrzeiten ab (Müller & Kaspar 2014).

$$E_{ia} = \log(G_{ia}) \cdot R \quad (3)$$

E_{ia} ergibt sich als Produkt aus dem logarithmischen geometrischen Mittel der Wiederkehrzeiten. Wird E_{ia} maximal, stellt es die größte Extremität des Niederschlagsereignisses in dem untersuchten Zeitfenster dar. Dieser Zeitpunkt, an dem die mittlere Extremität signifikanter ist als die Zunahme der Fläche, wird als WEI bezeichnet (Müller & Kaspar 2014).

Durch die räumliche Begrenzung auf ein beliebiges Untersuchungsgebiet wird auch ein zu analysierendes Niederschlagsereignis auf eine absolute Fläche bezogen. Dadurch ergibt sich eine Veränderung der Methodik zu Müller & Kaspar (2014). Infolgedessen wird der maximal zu erreichende WEI beschränkt. Das Maximum wird erreicht, sobald das geometrische Mittel den höchsten zu erreichenden Wert annimmt und die räumliche Ausdehnung das gesamte Untersuchungsgebiet abdeckt. Es lässt sich somit der Zusammenhang nach Gleichung 4 aufstellen [$\log(a)$ km].

$$WEI_{max} = \log(G_{ia_{max}}) \cdot R_{max} \quad (4)$$

Durch die Nutzung der Wiederkehrzeiten nach DWA (2012) bis $T_n = 100 a$ stellt dieser Wert somit den höchsten Wert dar, den ein Pixel bzw. eine Rasterzelle nach der Interpolation annehmen kann. Aus der Gleichung 4 lässt sich dementsprechend vorab für alle möglichen Untersuchungsgebiete der maximale WEI und somit das größte zu erwartende Ausmaß anhand des maximalen geometrischen Mittels $G_{ia} = 100 a$ und der Fläche a ableiten. Für das Untersuchungsgebiet der Stadt Dortmund mit einer Fläche von $a = 295,8$ km² kann sich somit nur ein maximaler $WEI_{max} = 19,4 \log(a)$ km einstellen.

4 ENTWICKLUNG EINES WERKZEUGS

Im Rahmen der Masterarbeit von Kelm (2017) sollte ein GIS-basiertes Werkzeug zur automatisierten Auswertung des WEI entwickelt werden. Die Grundlage bildete

das Geoinformationssystem ArcGIS in der Version 10.2 des Softwareherstellers ESRI, welches bereits bei EG/LV im produktiven Betrieb zum Einsatz kommt. Als Programmiersprache wurde Python mit Nutzung der Bibliothek *Numpy* festgelegt. Diese ist in ArcGIS integriert und wird direkt mit ausgeliefert, wodurch die Weiterentwicklung bzw. Wartung gesichert ist (Zandbergen 2015). Besondere zu berücksichtigende Aspekte waren die einfache Benutzbarkeit sowie die Wiederverwendbarkeit und Übertragbarkeit des Werkzeugs auf andere Ausgangsdaten. Für die Entwicklung von Werkzeugen in der ArcGIS-Umgebung stand das Modul *arcpy* zur Verfügung. Dadurch wurde der Zugriff auf sämtliche Funktionen und Geoverarbeitungswerkzeuge sowie Erweiterungen ermöglicht (Tateosian 2015, Zandbergen 2015). *Numpy* ist das grundlegende Paket für wissenschaftliche Berechnungen, da es zum einen komplexe mathematische Operationen erlaubt und zum anderen mehrdimensionale Arrays durch den Datentyp *ndarray* bereitstellt. Diese Arrays sind schnelle und flexible Container bzw. Behälter für homogene Datensätze und ermöglichen, mathematische Operationen im Ganzen durchzuführen (McKinney 2015).

Die Umsetzung des Werkzeugs kann grundlegend in vier Teilbereiche bzw. Arbeitsschritte gegliedert werden. Die Niederschlagsreihen und Wiederkehrzeiten sowie Koordinaten der Bodenstationen gilt es zunächst einzulesen und aufzubereiten, sodass diese effektiv genutzt werden können. Im zweiten Arbeitsschritt sind die Ausgangsdaten für die Interpolationen vorzubereiten. Es werden zum einen für jede einzelne Dauerstufe sowie für alle 21 zusammen die möglichen Kombinationen der Wiederkehrzeiten der Bodenstationen bestimmt. Im dritten Arbeitsschritt werden die Interpolationen auf Grundlage der Wiederkehrzeiten durchgeführt und aus dem resultierenden Raster jeweils die Zielgröße des E_{ia} -Werts berechnet. Im vierten und letzten Schritt werden die E_{ia} -Werte den Dauerstufen zugeordnet und der WEI ermittelt.

Die Softwareentwicklung wurde objektbasiert umgesetzt, sodass die einzelnen Werte als Attribute abgebildet und durch Methoden abgerufen werden können. Außerdem wurde das Einlesen der Ausgangsdaten sowie die Berechnung der E_{ia} -Werte,

wie in Abbildung 2 dargestellt, als Schnittstelle umgesetzt. Die einzelnen Komponenten des Werkzeugs lassen sich austauschen, um die Wiederverwendbarkeit zu gewährleisten. Im Folgenden werden die einzelnen Komponenten detailliert beschrieben.

4.1 DATENIMPORT

Die Niederschlagsdaten und Wiederkehrzeiten liegen als Exporte des Zeitreihenmanagementsystems TopoDesk im CSV-Dateiformat vor (toposoft 2017). Die Bibliothek *Numpy* bietet zum Einlesen von Daten spezielle Funktionen, um Arrays direkt einzulesen. Bei der Konzeption des Werkzeugs wurde zur Kapselung der Attribute und Zugriffsmethoden jeweils eine abstrakte Klasse entwickelt. Dadurch bleibt die Funktionsweise der konkreten Klassen der Wiederkehrzeiten (*Recurrence*) und Niederschlagshöhen (*Precipitation*) stets identisch. Für diese Klassen sind ausschließlich abstrakte *extract*-Methoden auszuformulieren. Diese beschreiben das Einlesen der Informationen aus den Ausgangsdateien. Für die Attribute wurden erweiterte Methoden entwickelt, die den Zugriff auf die Werte ermöglichen.

Die gleitende Summe ist für die Niederschlagsdaten von besonderer Bedeutung. Diese entspricht der gefallenen Niederschlagsmenge zum Zeitpunkt t innerhalb einer Dauerstufe D (z. B. 100 mm in 24 h). Zur Berechnung der gleitenden Summe wurde die Methode *get_floating_sum* entwickelt. Diese berechnet die Regenhöhe unter Angabe einer Dauerstufe. Nach der

Bestimmung kann anhand der Regenhöhe die zugehörige Wiederkehrzeit über den Algorithmus *get_recurrence* abgefragt werden. Dadurch ist es möglich, über die Regenhöhe und die zu betrachtende Dauerstufe die Wiederkehrzeit bestimmen zu lassen. Die beiden Klassen stellen die Ausgangsdaten anhand der Attribute dar und bieten außerdem Methoden für einen effektiven Zugriff auf die nötigen Daten bzw. deren berechneten Ergebnisse.

Als dritter Parameter wird die Lage der terrestrischen Niederschlagsstationen importiert. Diese Stationsdaten werden seitens EG/LV bereits in ArcGIS vorgehalten und können direkt über die *arcpy*-Bibliothek eingelesen und als *arcpy-Point* mit einer X- und Y-Koordinate gespeichert werden.

Als Eingabeparameter muss zusätzlich der Untersuchungszeitraum angegeben werden. Der Start- und Endzeitpunkt wird als *datetime*-Objekt konvertiert und in ein *ObservationPeriod*-Objekt gespeichert. Dieses stellt als Zeitfenster die Start- und Endzeitpunkte dar. Diese Angabe dient zum einen der Überprüfung der Datengrundlage, ob die Niederschlagsdaten dem Untersuchungszeitraum entsprechen und die Zeitreihenlänge für alle zu untersuchenden Dauerstufen ausreichend ist. Zum anderen wird die zu verwaltende Datenmenge auf die tatsächlich benötigten Niederschlagswerte reduziert, indem der eingelesene Datensatz auf das Zeitfenster begrenzt wird.

Eine Bodenstation wird intern über ein *Recurrence*-, *Precipitation*- und *Point*-Objekt

repräsentiert. Zur Kapselung wurde die Klasse *Station* eingeführt, die durch das Attribut der Stationsnummer eindeutig zu identifizieren ist. Diese dient der Repräsentation bzw. des Datenzugriffs auf die jeweiligen Attribute.

4.2 INTERPOLATION

Die verwendeten Bodenstationen decken nicht das gesamte Untersuchungsgebiet ab. Daher wird vorab der zu interpolierende Bereich definiert. Dazu werden die Ausgabeausdehnung sowie das Koordinatensystem in den Umgebungsvariablen temporär gesetzt. Nachdem alle Stationen mit ihren Wiederkehrzeiten und Niederschlagsdaten eingelesen und den Koordinaten der Bodenstationen zugeordnet wurden, wird ein Objekt *Interpolation* erzeugt. Die Interpolationen werden auf Grundlage der neun Stützpunkte der Bodenstationen durchgeführt (vgl. Abbildung 1). Der Wertebereich bzw. die diskreten Werte sind auf die Wiederkehrzeiten nach DWA (2012) von $T_n = 1$ bis 100 a begrenzt. Infolgedessen lässt sich ein Kombinationsvektor $k_i = [T_{n2112}, \dots, T_{n2241}]$ beschreiben. Die Reihenfolge der Stützpunkte ist durch den Ausgangsdatensatz der Bodenstationen vorgegeben und ändert sich im Laufe der Untersuchungen nicht. Bei der Berechnung können Vektoren doppelt vorkommen, infolgedessen die Anzahl der Interpolationen deutlich reduziert werden kann. Daher werden die Vektoren sowohl für jede Dauerstufe einzeln als auch für alle gemeinsam bestimmt. Zur Realisierung wurde die Methode *get_stations_recurrence* entwickelt. Diese bildet zunächst die gleitenden Summen für die jeweilige Dauerstufe und leitet anschließend aus den Regenhöhen die Wiederkehrzeiten sequenziell für alle Bodenstationen ab. Daraus kann für jeden Zeitschritt t_i ein Vektor der Wiederkehrzeiten bestimmt werden (Tabelle 1).

Des Weiteren werden Duplikate mit der Methode *get_unique_rows* herausgefiltert, sodass jede Kombination einmal enthalten bleibt. Diese werden wiederum zusammengefasst und daraus ebenfalls die eindeutigen Vektoren extrahiert. Nachdem die zu interpolierenden Wiederkehrzeiten bestimmt wurden, können die Interpolationen durchgeführt und der zugehörige E_{10} -Wert berechnet werden.

Aufgrund der Limitierung der Anzahl der Spalten der Shape-Spezifikation wurde

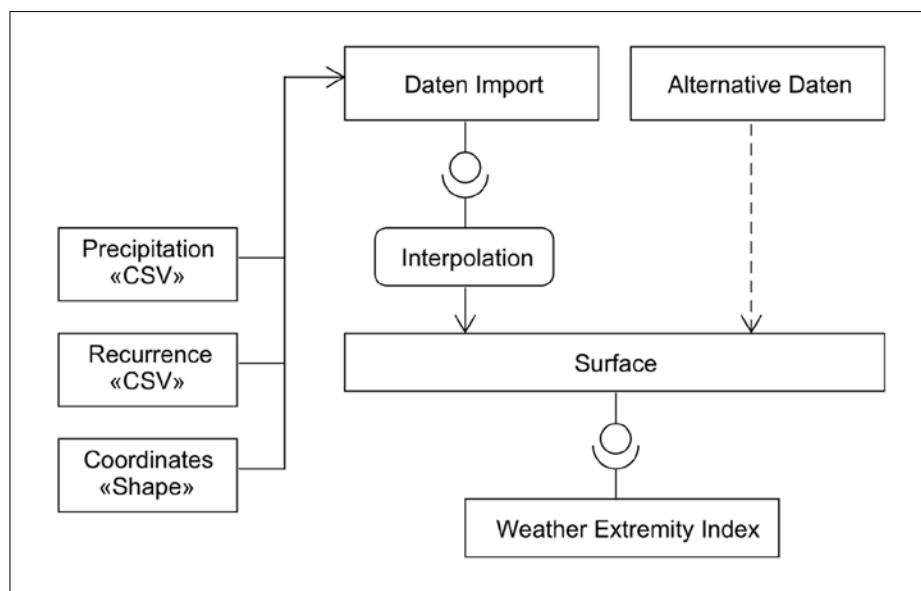


Abbildung 2: Komponenten des Werkzeugs

Zeitpunkt	Regenhöhen h_N [mm]				
	2112	2166	2241	2339	8767
t_0	0,0	32,0	85,8	4,4	0,0
t_1	1,5	40,7	102,1	23,1	0,0
t_2	2,0	37,4	91,3	23,9	0,0

→

Zeitpunkt	Wiederkehrzeiten T_n [a]				
	2112	2166	2241	2339	8767
t_0	1	20	100	1	1
t_1	1	100	100	3,3	1
t_2	1	33,3	100	3,3	1

Tabelle 1: Schematische Darstellung des Kombinationsvektors k_i

eine Lösung mithilfe des *Update Cursors* entwickelt (ESRI 1998, 2009). Die Werte der Attributtabellen im Shape-Format sind nicht mit generischen Einlese- und Schreibmethoden von Python zugänglich. Daher bietet die *arcpy*-Bibliothek die sogenannten *Cursor*, mit deren Hilfe Attribute aktualisiert werden können (Tateosian 2015), an. Dazu wird ein temporäres Punkt-Shape erzeugt, das als Grundlage dient. In jedem Berechnungsdurchlauf werden die Wiederkehrzeiten der Bodenstationen aktualisiert und die entsprechenden Interpolationen durchgeführt. Hierdurch können sehr große Zeitfenster betrachtet werden.

Als Interpolationsverfahren wurde aufgrund der vorliegenden Punktdichte und -lage das Inverse Distance Weighting (IDW), ein lokaler entfernungsgewichteter, deterministischer Interpolationsansatz, eingesetzt. Für den Wert einer Rasterzelle wird damit durch ein gewichtetes Mittel der benachbarten gemessenen Werte der terrestrischen Niederschlagsstationen ein eindeutiger und reproduzierbarer Wert bestimmt (Johnston et al. 2004, Mummenthey 2015). Zur Durchführung der Interpolationen und Berechnung der E_{ia} -Werte wird eine Iteration über die Kombinationen aller Dauerstufen durchgeführt.

Nach dem Verfahren von Müller & Kaspar (2014) werden die Wiederkehrzeiten zunächst mit dem dekadischen Logarithmus transformiert (vgl. Gleichung 2). Mit diesen umgeformten T_n -Werten wird das temporäre Punkt-Shape der Bodenstationen aktualisiert und die Interpolation durchgeführt. Anschließend wird das resultierende Raster mittels der Umkehrfunktion mithilfe der *Map Algebra* zurücktransformiert. Abbildung 3 zeigt ein solches interpoliertes Ergebnissraster mit einem Wertebereich der Wiederkehrzeiten von $T_n = 1$ bis 100α , welches auf das Untersuchungsgebiet zugeschnitten ist und in ein *Surface*-Objekt überführt wurde. Diese Klasse dient als Berechnungsschnittstelle und gewährleistet den Zugriff auf das Raster.

Nachdem dieses interpolierte Ergebnissraster hergestellt wurde, können im nächsten Bearbeitungsschritt auf dessen Grundlage der zugehörige E_{10} -Wert bestimmt werden. Zur technischen Umsetzung wurde die Klasse *WeatherExtremityIndex* entwickelt, die zur Berechnung des WEI dient. Außerdem wurde zum temporären Vorhalten des maximalen E_{10} -Wert die Klasse *Eta* erstellt.

4.3 BERECHNUNG DES WEI

Zur Berechnung der E_{io} -Werte wird das Raster der interpolierten Wiederkehrzeiten T_n zunächst in ein Numpy-Array überführt. Den Zellwerten außerhalb des Untersuchungsgebiets wird in diesem Bearbeitungsschritt der Wert 0 zugewiesen. Sie haben dadurch keine weiteren Auswirkungen auf die Ergebnisse. Die Zellen des Rasters werden nun über eine Matrix beschrieben. Mithilfe dieser Vorgehensweise können die nötigen mathematischen Berechnungen mittels Numpy durchgeführt werden.

Aus dem Array wird ein *WeatherExtremityIndex*-Objekt erzeugt, das die Berechnungsmethoden aller nötigen Schritte des E_{to} -Werts beinhaltet. Bei der Instanziierung werden durch die Methode *get_sorted_unique_values* die interpolierten Wieder-

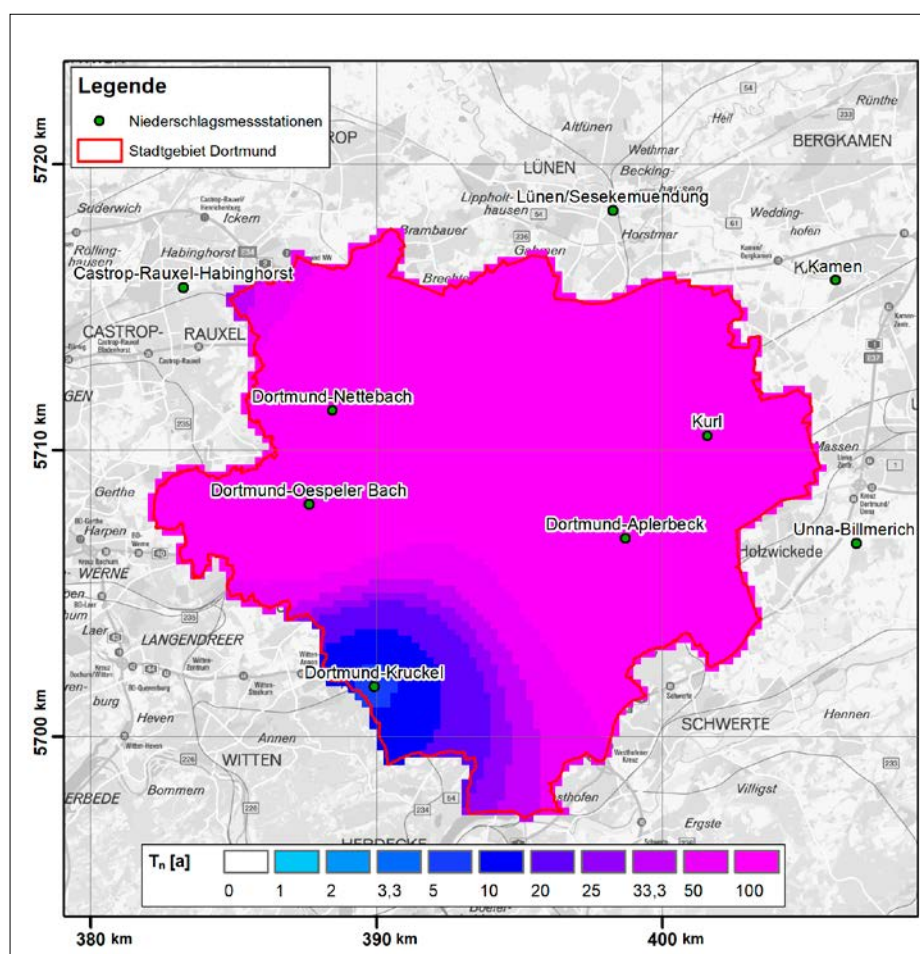


Abbildung 3: Interpolierte Wiederkehrzeiten (Datenquellen: EG/LV (2017), Regionalverband Ruhr, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie)

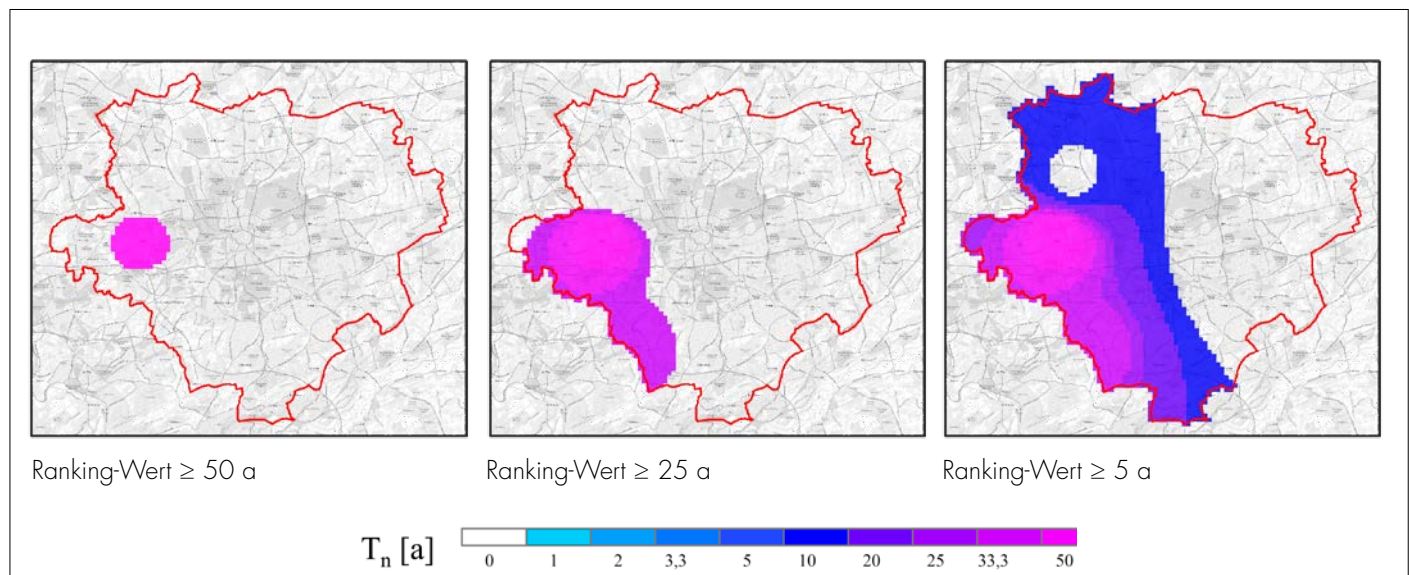


Abbildung 4: Darstellung der räumlichen Ausdehnung verschiedener Ranking-Werte (Datenquellen: EG/LV (2017), Regionalverband Ruhr, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie)

kehrzeiten absteigend dem Wert nach sortiert sowie doppelte Werte entfernt, wodurch das Ranking der Werte erfolgt. Infolgedessen besteht kein räumlicher Zusammenhang zwischen den Rasterzellen mehr, einzig der Wert fließt in die weitere Berechnung ein. Aus jedem Wert des Rankings wird ein zugehöriger E_{ta} -Wert berechnet. Dazu wurde die Hauptmethode *get_eta* entworfen. Als Übergabeparameter wird der zu untersuchende Ranking-Wert angegeben. Wie in Abbildung 4 dargestellt, vergrößert sich die zum G_{ta} -Wert zugehörige Fläche mit einer Verringerung des Rangs. Dementsprechend steigt die räumliche Ausdehnung bis zum letzten Ranking-Wert bis auf das Maximum.

Zur Berechnung werden zunächst jene Werte abgefragt, die entweder größer oder gleich dem Untersuchungswert sind. Die Werte, bei denen dies zutrifft, werden mit dem dekadischen Logarithmus transformiert und das arithmetische Mittel gebildet. Im weiteren Bearbeitungsschritt gilt es, den theoretischen Radius des betroffenen Gebiets zu bestimmen, wobei eine Normierung der Flächen auf die Einheit Kilometer durchgeführt werden sollte. Dadurch kann bei dem Werkzeug ein Bezugsraster mit beliebiger Rasterweite genutzt werden. Aus der Anzahl der Zellen n und der Rasterweite wird die zugehörige Fläche bestimmt. Nachdem die Parameter G_{ta} und R bestimmt wurden, kann der E_{ta} -Wert berechnet werden. Dieser lässt sich über das Produkt aus der Extremität bzw. Seltenheit

und der räumlichen Ausdehnung des Wetterereignisses beschreiben (vgl. Abschnitt 3).

Als Rückgabe der Methode *get_eta* fungiert der E_{ta} -Wert sowie die zugehörige Fläche. Diese Berechnung wird für sämtliche Ranking-Werte durchgeführt und die Ergebnisse in zwei separaten Listen für E_{ta} und die Fläche gespeichert. Anschließend wird daraus der größte Wert für das interpolierte Raster herausgefiltert und zwischengespeichert. Um die Ergebnisse im nächsten Bearbeitungsschritt den jeweiligen Dauerstufen zuweisen zu können, wird auf ein Dictionary zurückgegriffen. Dabei können mehrere Objekte als Liste unter Angabe eines Schlüssels abgespeichert und abgefragt werden. Aus den Kombinationen der Wiederkehrzeiten als Kombinationsvektor $k_i = [T_{n112}, \dots, T_{n2241}]$ mit dem Index i der eindeutigen Nummer der Bodenstationen wird der Schlüssel als Zeichenkette generiert. Diese ist eindeutig und lässt sich bei der Interpolation sowie beim späteren Abruf erneut generieren. Nach der Durchführung aller notwendigen Interpolationen kann der WEI bestimmt werden.

Im letzten Bearbeitungsschritt werden die Ergebnisse der Interpolation den einzelnen Dauerstufen zugeordnet und der maximale E_{ta} -Wert bestimmt. Dazu wird wiederum eine Iteration über die Dauerstufen sowie über die Kombinationen der Dauerstufen selbst durchgeführt. Zum temporären Vorhalten des maximalen E_{ta} -Werts

wurde die Klasse *Eta* erzeugt. Diese dient ausschließlich dem Speichern des maximalen Werts. Neben dem Wert und der räumlichen Ausdehnung sind die exakten Zeitpunkte, an denen das Starkregenereignis seine maximale Extremität erreicht, von Interesse, wozu die Methode *get_timestamps* entworfen wurde. Dieser werden die gleitenden Summen sowie die beim Durchlauf zu betrachtenden Wiederkehrzeiten übergeben. Aus den Summen werden wiederum die Zeitpunkte abgefragt, an denen diese spezielle Kombination exakt zutrifft. Hieraus können die Zeitstempel einer Station ausgelesen werden. Über die Methode *Update* werden dann der Wert des E_{ta} , die Fläche, die Zeitstempel und das Raster als Surface-Objekt zwischengespeichert. Bei jedem Durchlauf wird überprüft, ob der aktuelle Wert den Wert des E_{ta} -Objekts übertrifft. Ist dies der Fall, werden die Attribute mit den aktuellen Werten überschrieben. Dies wird zum einen innerhalb einer Dauerstufe durchgeführt und schließlich für alle komplettiert. Nachdem eine Dauerstufe final ausgewertet wurde, werden die Werte des E_{ta} -Objekts zwischengespeichert und nach Abschluss aller Berechnungen als CSV-Datei persistiert. Dadurch ist ein Rückschluss auf alle Dauerstufen möglich. Nachdem für alle Dauerstufen die Berechnungen durchgeführt wurden, werden die maximalen Werte, die in dem E_{ta} -Objekt gespeichert sind, ebenfalls in ein globales E_{ta} -Objekt überführt. Dieses repräsentiert dabei den WEI, da es über alle Dauerstufen hin-

weg den größten E_{10} -Wert abspeichert. Das Resultat der Berechnungen ist somit eine CSV-Datei, die für alle Dauerstufen die maximalen E_{10} -Werte, Flächen, Kombinationen und Zeitpunkte bereitstellt. Neben der wertmäßigen Beschreibung des Extremereignisses wird das zugehörige interpolierte Ergebnistraster des WEI wie in Abbildung 5 ausgegeben.

Der kleinste Ranking-Wert der Wiederkehrzeiten, der in die Berechnung des WEI eingegangen ist, wird als T_G definiert. Anhand dieses Grenzwerts konnte die charakteristische Fläche aus den Rasterzellen mit Werten größer des Grenzwerts $T_G = 8 \text{ a}$ abgeleitet werden.

4.4 EINBINDUNG IN DIE ARCGIS-UMGEBUNG

Nach dem Abschluss der Implementierung wurde das Werkzeug in die Umgebung von ArcGIS integriert. Mithilfe von ArcGIS wird eine benutzerfreundliche Oberfläche erzeugt, welche alle benötigten Eingangsdaten für die Ausführung der Analyse abfragt. Dabei sind alle Parameter eindeutig anzugeben. Die Anwendung prüft für alle Ausgangsdaten, ob diese plausibel und konsistent sind. Das bedeutet, die terrestrischen Niederschlagsstationen müssen mit ihren anzugebenden Wiederkehrzeiten sowie Niederschlagsdaten übereinstimmen. Dadurch soll verhindert werden, dass die Analyse möglicherweise mit unvollständigen Ausgangsdaten durchgeführt wird. Nach dem Öffnen des Werkzeugs erscheint die in Abbildung 6 dargestellte Benutzeroberfläche.

5 DISKUSSION UND AUSBLICK

Zur Bestimmung des WEI wurde in der Masterarbeit von Kelm (2017) ein ArcGIS-Werkzeug entwickelt, um mit neun langjährigen lückenbereinigten Niederschlagszeitreihen am Beispiel des Stadtgebiets von Dortmund die maximale Extremität von in der Vergangenheit aufgetretenen Niederschlagsereignissen zu untersuchen. Die zur Verfügung gestellten Niederschlagszeitreihen im Stadtgebiet von Dortmund und angrenzender Umgebung wurden von EG/LV als betreibenden Wasserwirtschaftsverbänden zur Verfügung gestellt. Bei der Konzeption des ArcGIS-Werkzeugs wurde beachtet, dass es auch auf weitere Teileinzugsgebiete im Verbandsgebiet von EG/LV, dem Emscher-Lippe-Raum, angewendet

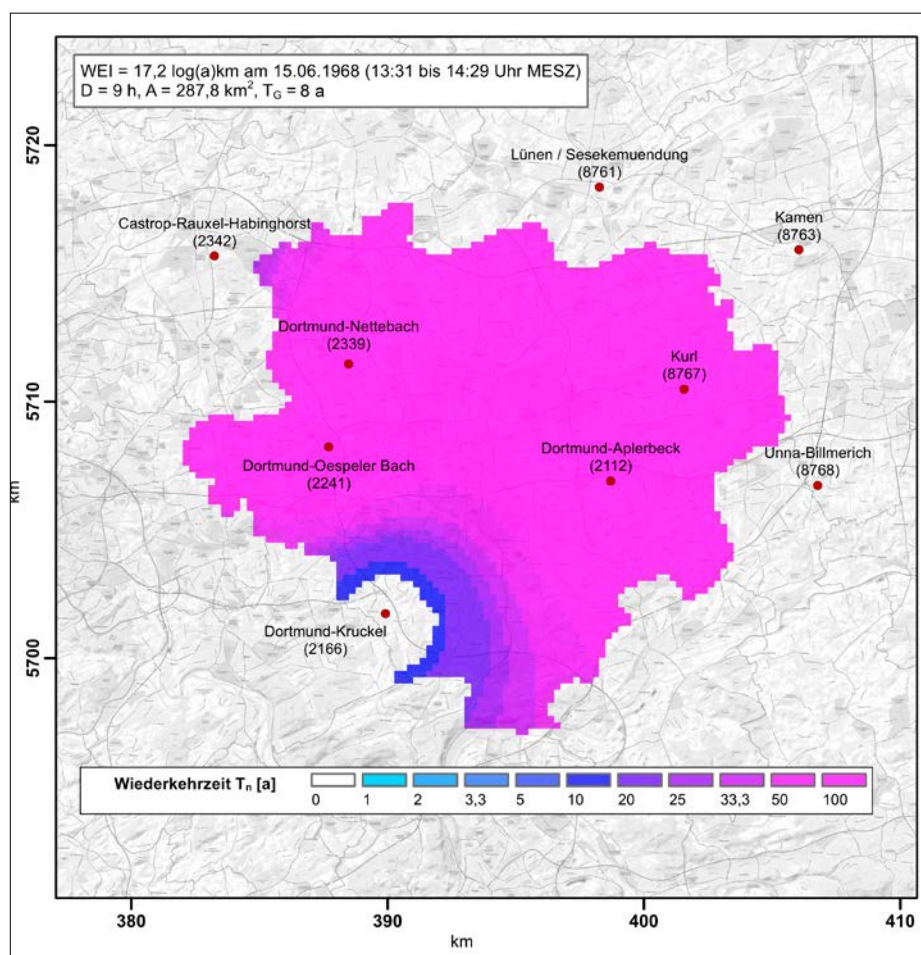


Abbildung 5: Charakteristische räumliche Ausdehnung des WEI für das Niederschlagsereignis vom 15.06.1968 (MESZ – Mitteleuropäische Sommerzeit, MESZ = UTC + 2 h; Datenquellen: EG/LV (2017), Regionalverband Ruhr)

werden kann. Ein weiteres Augenmerk wurde auf die Integration in die Produktumgebung der IT-Infrastruktur gelegt, sodass der WEI als ein ergänzendes Analysetool zur Bewertung von Starkregen in der Risikokommunikation bei EG/LV eingesetzt werden kann.

Eine der größten Schwierigkeiten innerhalb der Masterarbeit von Kelm (2017) stellte die Bestimmung der flächenhaften Wiederkehrzeiten dar. Die zur Interpolation genutzten Ausgangsdaten der langjährigen terrestrischen Niederschlagsstationen liegen in punktueller Form mit fest definierten Werten nach DWA A-531 vor. Durch die immer größer werdenden Intervallbreiten ab $T_n = 25$ bis 100 a ergeben sich starke Gefälle bzw. Steigungen. Diese großen Schrittweiten der Wiederkehrzeiten T_n sind zu überdenken. Eine höhere bzw. differenzierte Auflösung führt zu einer besseren Anpassung der Oberfläche und erhöht somit die Genauigkeit der einzelnen Stützpunkte, sodass die starken Gefälle redu-

ziert werden. Außerdem sollte der obere Wertebereich ($T_n = 100 \text{ a}$) erweitert werden. Es wird deutlich, dass die registrierten Niederschlagshöhen diese Wiederkehrzeit teilweise um ein Vielfaches übertreffen, diese jedoch begrenzt wird. Durch die langen Messreihen von teilweise über 80 Jahren wäre diese Erweiterung statistisch nach Maniak (2010) vertretbar und würde nach dem PEN-LAWA-Verfahren (Verworn & Draschhoff 2008) eine mögliche sinnvolle Ergänzung darstellen.

Das erzeugte Werkzeug wurde mit zwei verschiedenen Schnittstellen implementiert. Zum einen, um auch andere Ausgangsdaten verwenden zu können, zum anderen, um die Berechnung des WEI dynamisch zu gestalten. Als Grundlage diente dabei ein Rasterbild der flächendeckenden Wiederkehrzeiten T_n . Daher können sämtliche Daten verwendet werden, aus denen ein solches Rasterbild erzeugt werden kann. Hierbei ist vor allem das RVV-Komposit (Radarprodukt) der Radar-Online

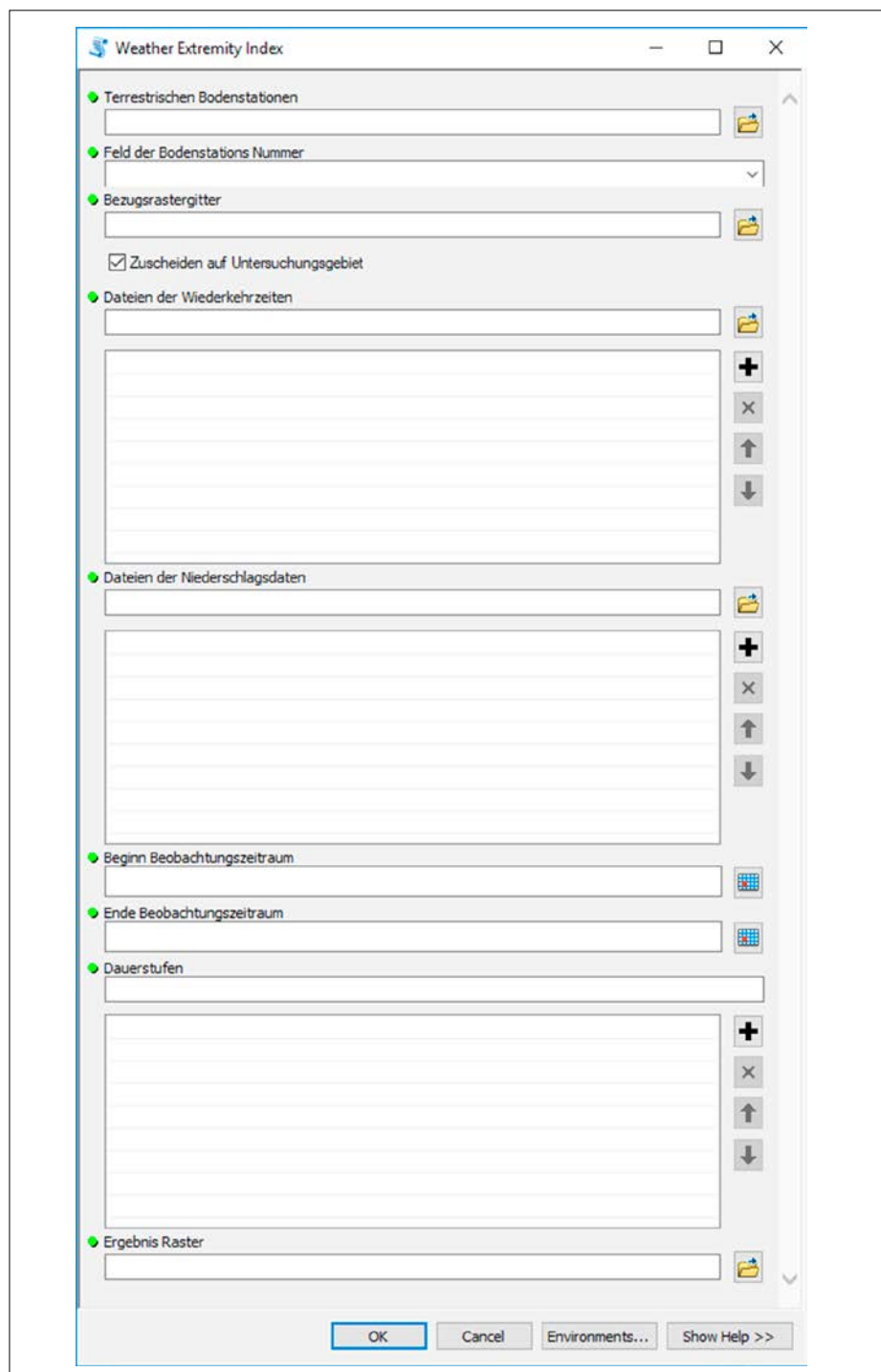


Abbildung 6: Screenshot der Benutzeroberfläche des ArcGIS-Werkzeugs Weather Extremity Index

Aneichung-Auswertungen (RADOLAN) des Deutschen Wetterdiensts (DWD) hervorzuheben (Bartels et al. 2004). Dabei handelt es sich um Niederschlagswerte, die in einem flächendeckenden Raster für das gesamte Bundesgebiet mit einer räumlichen Auflösung von 1 km² und zeitlicher Auflösung von einer Stunde seit Juni 2005 erfasst werden (Bartels et al. 2004, Patt & Jüpner 2013). Diese bieten den Vorteil, dass Niederschlagsdaten für die Zwischenbereiche der terrestrischen Niederschlags-

stationen erfasst werden. Allerdings eignen sich diese Daten aufgrund der kurzen Zeilenlänge aktuell noch nicht für extremwertstatistische Auswertungen (Bartels et al. 2004). Infolge der Nutzung dieser Daten könnten jedoch zukünftig sämtliche Unsicherheiten in der Interpolation der Wiederkehrzeiten umgangen werden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sich durch die Methodik des WEI Wetterereignisse über die Seltenheit und räumliche Ausdehnung klassifizieren und

charakterisieren lassen. Allerdings zeigen die Untersuchungen nach Kelm (2017) erhebliche Schwächen des Verfahrens auf. Um einen Index nach der WEI-Methodik zur Risikokommunikation für die Öffentlichkeit zu bestimmen, ist dieser kritisch zu bewerten und vor dem Hintergrund, dass er nicht dimensionslos ist (Einheit: $[\log(a) \text{ km}]$), für Kommunikationszwecke zu hinterfragen. Aufgrund der Einschränkung auf ein Stadtgebiet ist der Maximalwert nicht einheitlich definiert und damit eine Einschätzung ausschließlich anhand des Werts des WEI nicht unmittelbar nachvollziehbar. Allerdings kann die Angabe des prozentualen Anteils zum maximal zu erreichenden Wert angegeben werden. Durch die Normierung lassen sich WEI verschiedener Niederschlagsereignisse in fest definierten Untersuchungsgebieten miteinander vergleichen. Für die interne Bewertung von Starkregenereignissen in der ELR kann dieser Index daher sinnvoll sein. In der jüngsten Vergangenheit wurden zudem Forschungsansätze zu Starkregenindizes vorgestellt, die inzwischen vereinheitlicht wurden. In Zukunft besteht weiterhin Forschungsbedarf, da das Interesse und die Nachfrage aufgrund der immer häufiger auftretenden Extremereignisse in Deutschland stetig steigen.

Literatur

- Bartels, H.; Weigl, E.; Reich, T.; Lang, P.; Wagner, A.; Kohler, O.; Gerlach, N. (2004): Projekt RADOLAN. Routineverfahren zur Online-Aneichung der Radarniederschlagsdaten mithilfe von automatischen Bodenniederschlagsstationen (Ombrometer). https://www.dwd.de/DE/leistungen/radolan/radolan_info/abschlussbericht_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=2, Zugriff 07/2017.
- Bronstert, A.; Agarwal, A.; Boessenkool, B.; Fischer, M.; Heistermann, M.; Köhn-Reich, L.; Moran, T.; Wendi, D. (2017): Die Sturzflut von Braunsbach am 29. Mai 2016 – Entstehung, Ablauf und Schäden eines „Jahrhunderereignisses“: Teil 1: Meteorologische und hydrologische Analyse. In: *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 61 (3), S. 150-162.
- DKKV (2003): Hochwasservorsorge in Deutschland: Lernen aus der Katastrophe 2002 im Elbegebiet. Heft 29. Deutsches Komitee für Katastrophenvorsorge e.V. (DKKV), Bonn.
- DIN 4049-3 (1994): Hydrologie. Begriffe zur quantitativen Hydrologie. Beuth, Berlin.
- DWA (2012): Arbeitsblatt DWA-A 531: Starkregen in Abhängigkeit von Wiederkehrzeit und Dauer. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA), Hennef.
- EG/LV (2017): Niederschlagsdaten von Emscher-Genossenschaft und Lippeverband (EG/LV), Stand: 2016. Essen.
- ESRI (1998): ESRI Shapefile Technical Description: An ESRI White Paper. <https://www.esri.com/library/whitepapers/pdfs/shapefile.pdf>, Zugriff 11/2017.
- ESRI (2009): ArcGIS Desktop Help 9.3 – Geoprocessing considerations for shapefile output. <http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=Geoprocessing%20considerations%20for%20shapefile%20output>, Zugriff 11/2017.
- Grisa, T. M. (2013): Relabeling Extreme Rainfall Events so the Public Understands Their Severity. In: *Proceedings of the Water Environment Federation, WEFTEC 2013, Chicago (USA): Session 10 through Session 19*, S. 1335-1345 (11).
- Grüning, H.; Grimm, M. (2015): Unwetter mit Rekordniederschlägen in Münster. In: *KW Korrespondenz Wasserwirtschaft*, 8 (2), S. 88-93.
- Johnston, K.; Ver Hoef, J. M.; Krivoruchko, K.; Lucas, N. (2004): ArcGIS 9: Using ArcGIS geostatistical analyst. Esri Press, Redlands, CA.
- Kelm, T. (2017): Entwicklung und Implementierung eines „Weather Extremity Index (WEI)“ zur Bewertung von Starkregenereignissen unter Berücksichtigung räumlicher und zeitlicher Verteilungen. Masterarbeit, Fachbereich Geodäsie, Hochschule Bochum (unveröffentlicht).
- Krüger, M.; Pfister, A. (2016): Anwendung von Starkregenindex-Verfahren zur Unterstützung der Risikokommunikation in der Emscher-Lippe-Region. In: *KW Korrespondenz Wasserwirtschaft*, 9 (7), S. 412-419.
- LANUV NRW (2014): Starkregen in Nordrhein-Westfalen: Münster mit 292 Litern je Quadratmeter rekordverdächtig. https://www.lanuv.nrw.de/landesamt/veroeffentlichungen/pressemitteilungen/details/?tx_ttnews%5Btt_news%5D=916&cHash=d0434342cc7e67e75c5b9a60b0f2c009, Zugriff 11/2017.
- Maniak, U. (2010): Hydrologie und Wasserwirtschaft: Eine Einführung für Ingenieure. Springer, Berlin/Heidelberg.
- McKinney, W. (2015): Datenanalyse mit Python: Auswertung von Daten mit Pandas, NumPy und IPython. O'Reilly, Köln.
- Mudersbach, C. (2016): Ableitung eines Starkregenindex in Abhängigkeit von Jährlichkeit und Regendauer. https://www.researchgate.net/profile/Christoph_Mudersbach/publication/305221587_Ableitung_eines_Starkregenindex_in_Abhangigkeit_von_Jaehrlichkeit_und_Regendauer/links/57fb312108ae8da3ce5bdd18/Ableitung-eines-Starkregenindex-in-Abhaengigkeit-von-Jaehrlichkeit-und-Regendauer.pdf, Zugriff 11/2017.
- Mudersbach, C.; Krüger, M.; Pfister, A.; Netzel, F. (2017): Starkregenindizes: Geeignete Instrumente für die Risikokommunikation in Zeiten des hydrologischen Wandels? In: *Casper, M.; Gronz, O.; Ley, R.; Schütz, T. (Hrsg.): Den Wandel messen – Wie gehen wir mit Nichtstationarität in der Hydrologie um? Beiträge zum Tag der Hydrologie am 23./24. März 2017 an der Universität Trier, Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, Heft 38.17, S. 151-160.
- Müller, M.; Kaspar, M. (2014): Event-adjusted evaluation of weather and climate extremes. In: *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14 (2), S. 473-483.
- Mummenthey, R.-D. (2015): ArcGIS Spatial Analyst: Geoverarbeitung mit Rasterdaten. Wichmann, Berlin/Offenbach.
- Patt, H.; Jüpner, R. (2013): Hochwasser-Handbuch: Auswirkungen und Schutz. Springer Vieweg, Wiesbaden.
- Schmitt, T. G. (2014): Starkregenindex zur Kommunikation von Überflutungsursachen und Risiken. In: *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall*, 61 (8), S. 681-687.
- Schmitt, T. G. (2015): Weiterentwicklung des Starkregenindex zur Verwendung in der kommunalen Überflutungsvorsorge. In: *gwf – Wasser|Abwasser*, 156 (7-8), S. 774-781.
- She, D.; Shao, Q.; Xia, J.; Taylor, J. A.; Zhang, Y.; Zhang, L.; Zhang, X.; Zou, L. (2015): Investigating the variation and non-stationarity in precipitation extremes based on the concept of event-based extreme precipitation. In: *Journal of Hydrology*, 530, S. 785-798.
- Tateosian, L. (2015): Python For ArcGIS. Springer International Publishing, Cham.
- toposoft (2017): TopoDesk: Modulares System zur Messdatenverwaltung. https://www.toposoft.de/sitemap_de/3_SERVICE/main_left/Dokumentation/topodesk/topodesk.pdf, Zugriff 11/2017.
- Verworn, H. R.; Draschhoff, R. (2008): PEN-Erweiterung: Untersuchungen und Datenanalysen für ein Verfahren zur Ermittlung von extremen Starkniederschlagshöhen kurzer Dauerstufen auf der Grundlage von KOSTRA-DWD-2000 und PEN-LAWA 2005: Ein F+E Vorhaben im Auftrag der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA), Schlussbericht.
- Vogel, K.; Ozturk, U.; Riemer, A.; Laudan, J.; Sieg, T.; Wendi, D.; Agarwal, A.; Rözer, V.; Korup, O.; Thieken, A. (2017): Die Sturzflut von Braunsbach am 29. Mai 2016 – Entstehung, Ablauf und Schäden eines „Jahrhunderereignisses“. Teil 2: Geomorphologische Prozesse und Schadensanalyse. In: *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 61 (3), S. 163-175.
- Zandbergen, P. A. (2015): Python Scripting for ArcGIS. Esri Press, Redlands, CA.