

Title	Kartierung und Simulation von Überschwemmungsflächen in urbanen Räumen nach Starkregenereignissen
Authors	Schütze, Anna Alina;Banning, Andre;Bender, Steffen
Publication date	2021-01-12
Original Citation	Schütze, A.A., Banning, A. and Bender, S. (2021) 'Kartierung und Simulation von Überschwemmungsflächen in urbanen Räumen nach Starkregenereignissen', Grundwasser - Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie, 26, pp. 87-97. doi: 10.1007/s00767-020-00470-y
Type of publication	Article (peer-reviewed)
Link to publisher's version	<a href="https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00767-020-00470-y">https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00767-020-00470-y</a> - 10.1007/s00767-020-00470-y
Rights	© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2021. This version of the article has been accepted for publication, after peer review and is subject to Springer Nature's AM terms of use, but is not the Version of Record and does not reflect post-acceptance improvements, or any corrections. The Version of Record is available online at: <a href="http://dx.doi.org/10.1007/s00767-020-00470-y">http://dx.doi.org/10.1007/s00767-020-00470-y</a>
Download date	2023-09-30 19:00:41
Item downloaded from	<a href="https://hdl.handle.net/10468/12340">https://hdl.handle.net/10468/12340</a>



# UCC

**University College Cork, Ireland**  
Coláiste na hOllscoile Corcaigh

1 **Kartierung und Simulation von Überschwemmungsflächen in**  
2 **urbanen Räumen nach Starkregenereignissen**  
3 **Mapping and simulation of urban flooding after heavy rain events**

4  
5 **Header: Simulation urbaner Überschwemmungsflächen nach**  
6 **Starkregenereignissen**

7  
8 Anna Alina Schütze<sup>1</sup>, Andre Banning<sup>2</sup>, Steffen Bender<sup>3</sup>

9 <sup>1</sup> Lehrstuhl Angewandte Geologie, Ruhr-Universität Bochum, Universitätsstraße 150, 44801 Bochum, Deutschland

10 Tel.: +49 (0) 15256180761

11 E-Mail: [anna.schuetze@rub.de](mailto:anna.schuetze@rub.de)

12  
13 <sup>2</sup> Lehrstuhl Angewandte Geologie, Ruhr-Universität Bochum, Universitätsstraße 150, 44801 Bochum, Deutschland

14 Tel.: +49 (0) 234 32-23298

15 E-Mail: [andre.banning@rub.de](mailto:andre.banning@rub.de)

16  
17 <sup>3</sup> Climate Service Center Germany (GERICS), Fischertwiete 1, 20095 Hamburg, Deutschland

18 Tel.: +49 (0) 40 226 338 432

19 E-Mail: [steffen.bender@hzg.de](mailto:steffen.bender@hzg.de)

20  
21 **Schlüsselwörter**

22 Starkregen, Überschwemmungsgebiete, Hydrologische Modellierung, Gefahrenkarte n,  
23 Klimawandel, Hec-Ras, Flood-Area

24  
25 **Keywords**

26 Heavy rain, Inundation areas, Hydrological modelling, Hazard maps, Climate change, Hec-Ras,  
27 Flood-Area

28  
29 **Zusammenfassung**

30 In vielen Regionen werden Extremniederschlagsereignisse im Zuge des Klimawandels an  
31 Anzahl und Intensität zunehmen, was insbesondere für urbane Gebiete große  
32 Herausforderungen im Oberflächen- und Grundwassermanagement bedeutet.

33 Vor diesem Hintergrund wurden für ein Untersuchungsgebiet im Ruhrgebiet hydrodynamische  
34 Modellierungen mit unterschiedlichen Niederschlagsintensitäten durchgeführt, basierend auf  
35 einer Kartierung abflussrelevanter Fließhindernisse und einem digitalen Geländemodell. Zur  
36 Geodatenverarbeitung und Kartenproduktion dienten die Simulationsprogramme FloodArea  
37 und Hec-Ras. Ziel war die Erstellung szenarienbasierter Gefahrenkarten, darauf basierend  
38 wurden Optimierungsvorschläge für die Anpassung an Starkregenereignisse erarbeitet.

39 Die Modellierungen mit beiden Programmen zeigen Ähnlichkeiten bei der Lage der Hot Spots.  
40 Allerdings sind Unterschiede bei den Wasserspiegellagen zu beobachten: die FloodArea-

41 Modelle zeigen, vermutlich durch limitierte Randbedingungsoptionen, deutlich höhere Werte  
42 als die Hec-Ras-Modelle. Dennoch liefern sie eine realistische Visualisierung  
43 überschwemmungsgefährdeter Gebiete. Die gezeigte Vorgehensweise kann genutzt werden,  
44 um Auswirkungen zukünftiger Starkregenereignisse zu simulieren, sie liefert für die  
45 Stadtplanung Entscheidungshilfen zu Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel. So lassen  
46 sich beispielsweise Standorte für Retentionsflächen bestimmen.

47

## 48 **Abstract**

49 In many regions, the number and intensity of extreme precipitation events will increase as a  
50 result of climate change, which will pose major challenges for spatial planning and climate  
51 adaptation, particularly for metropolitan regions.

52 Based on a digital terrain model and on a mapping of the flow obstacles relevant for  
53 precipitation flow, hydrodynamic modelling with different precipitation intensities was carried  
54 out for an investigation area in the Ruhr area. The simulation tool FloodArea and Hec-Ras were  
55 used for geodata processing and the production of hazard maps.

56 The results of the modelling with both programs show similarities in the distribution of the  
57 areas with highest flood levels. However, differences can be observed in absolute heights. The  
58 approach shown can be used to simulate the effects of future heavy rainfall events and provides  
59 urban planning (location of retention areas) decision support for adaptation measures to climate  
60 change.

61

62

## 63 **Veranlassung und Zielsetzung**

64 Starkregenereignisse stellen schon in der Vergangenheit eine große Herausforderung für viele  
65 Städte und Gemeinden dar. Nach Einschätzungen des Weltklimarates (IPCC) soll die  
66 Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen in Deutschland als Folge des  
67 Klimawandels weiter zunehmen (Geisel 2016). Ein vorausschauender und  
68 verantwortungsbewusster Umgang mit diesen Extremereignissen ist demnach entscheidend für  
69 das Ausmaß der Folgen.

70 Die Auswirkungen von Starkregen sind insbesondere in urbanen Räumen zu spüren, wobei  
71 nicht selten Sachschäden in Millionenhöhe entstehen. Ein steigender Versiegelungsgrad, die  
72 fortschreitende Urbanisierung einschließlich der Vernetzung der kritischen Infrastruktur und  
73 das Voranschreiten des Klimawandels führen jeweils und insbesondere in der Summe zu einer  
74 Verschärfung der Problematik. Zudem führt eine schwierige Vorhersage in Form von Zeitpunkt

75 und Dimension eines Starkregenereignisses zu einem geringen Handlungsspielraum für  
76 Betroffene und Hilfskräfte (BBK 2015).

77 Die verheerenden Auswirkungen der Überschwemmungen in urbanen Räumen zwingen  
78 zunehmend die Verwaltungen von Städte und Kommunen sich mit dem Thema „Anpassung an  
79 die Folgen des Klimawandels“ auseinander zu setzen. Zur Minimierung der Risiken und  
80 Auswirkungen von Starkregen sind geeignete Schutz- und Vorsichtsmaßnahmen zu treffen  
81 (Porth und Schüttrumpf 2017). Dabei spielen Retentionsflächen eine wichtige Rolle. Sie dienen  
82 im Falle eines Ereignisses zur Zwischenspeicherung des Niederschlagswassers und damit zur  
83 Entlastung des öffentlichen Kanalnetzes (Stadt Köln 2017). Eine an Starkregen angepasste  
84 Stadtentwicklung und zukünftige Raumplanung bildet ebenfalls die Grundlage eines  
85 erfolgreichen Handelns um die Folgen eines Starkregenereignisses möglichst gering zu halten  
86 (Stadt Dortmund, Stadtentwässerung 2014).

87 Ein weiteres durch den Klimawandel bedingtes Problem, welches auf die prognostizierte  
88 Intensivierung der Niederschlagsereignisse sowie eine Abnahme der Schneefälle  
89 zurückzuführen ist, ist bei gleichbleibender Niederschlagsmenge auf kurze Sicht eine Zunahme  
90 des oberflächigen Abflusses (Mosbrugger et al. 2014).

91 In diesem Rahmen ist das Ziel der hier präsentierten Studie, mit Hilfe von Gefahrenkarten die  
92 unmittelbaren Auswirkungen von Starkregenereignissen in einem urbanen Raum zu  
93 visualisieren. Die modellierten Starkregengefahrenkarten können dazu genutzt werden,  
94 gefährdete Bereiche zu lokalisieren, um vor Ort geeignete Vorsichtsmaßnahmen einzuleiten.  
95 Besonders mit Blick auf die sich in Zukunft voraussichtlich häufenden Starkregenereignisse  
96 bilden die Methoden zur Gestaltung von Gefahrenkarten die Möglichkeit,  
97 Präventionsmaßnahmen einzuleiten und Schäden so zu minimieren.

98

## 99 **Hintergrund**

### 100 **Untersuchungsgebiet**

101 Das Untersuchungsgebiet für die exemplarische Durchführung der Simulation von  
102 Überschwemmungsflächen bildet der Stadtteil Witten-Annen im urban geprägten südöstlichen  
103 Teil des Ruhrgebietes des Bundeslandes Nordrhein-Westfalen. Die Stadt Witten zählt mit rund  
104 99.000 Einwohnern zur größten Stadt des Ennepe-Ruhr-Kreises. Insgesamt weist sie eine  
105 Fläche von 72 km<sup>2</sup> auf, was eine Einwohnerdichte von 1.367 je km<sup>2</sup> entspricht. Die höchste  
106 Siedlungsdichte befindet sich im zentralen Bereich des Stadtzentrums von Witten (Stadt Witten  
107 2016). Die versiegelte Fläche pro Einwohner der Stadt liegt mit rund 17,1 % (Leibniz-Institut  
108 für ökologische Raumentwicklung e.V. 2012). Das Untersuchungsgebiet befindet sich im

109 südlichen Teil des größten der insgesamt sieben Stadtgebiete Wittens. Es erstreckt sich über  
110 eine Breite von 1,2 km in ost-westlicher Richtung sowie eine Länge von 1,5 km in nord-  
111 südlicher Richtung mit einer Gesamtfläche von ungefähr 1,8 km<sup>2</sup>. Begrenzt wird es durch die  
112 Städte Dortmund, Herdecke, Wetter, Sprockhövel, Hattingen und Bochum.

113

114 Das Untersuchungsgebiet befindet sich im Grenzbereich zwischen der Münsterländischen  
115 Tieflandsbucht im Norden und dem Sauerland im Süden. Das Stadtgebiet von Witten kann  
116 hinsichtlich seiner Topographie in drei Sektoren eingeteilt werden. Im nördlichen Teil liegen  
117 die Stockumer Höhen, die Höhen von 120 bis 160 m ü. NN aufweisen. Südlich davon schließt  
118 die Witten-Hörder-Mulde an, die den westlichen Ausläufer der Hellwegbörde darstellt. In  
119 diesem Bereich treten typische Höhen von um die 100 m ü. NN auf. Der südliche Teil grenzt  
120 an die Niederbergisch-Märkische-Hügellandschaft mit dem Ardeygebirge an. In dieser Region  
121 erreichen die Höhen bis zu 250 m ü. NN (Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen 1980).  
122 Die höchsten Erhebungen des Untersuchungsgebietes sind im Süden und Südosten zu finden  
123 sind. In nördlicher Richtung sowie in zentraler Richtung nimmt die Höhe kontinuierlich ab. Die  
124 niedrigsten Höhen werden somit ganz im Norden sowie im Zentrum des Untersuchungsgebietes  
125 angetroffen. Der zentrale Bereich bildet eine Senke mit einem Höhenunterschied von ungefähr  
126 10 m zur östlichen und westlichen Flanke (Abb. 1).

127

128 Geologisch befindet sich das Gebiet im Grenzbereich zwischen dem Rheinischen  
129 Schiefergebirge im Süden und dem Münsterländer Kreidebecken im Norden (Henning sen  
130 1986). Charakteristisch für den nördlichen Teil des Untersuchungsgebietes sind an der  
131 Oberfläche anstehende quartäre Ablagerungen, bestehend aus Löss und Auelehm. Der südliche  
132 Teil ist überwiegend geprägt durch paläozoische Ablagerungen aus dem Oberkarbon mit  
133 schwach tonig bis tonigen Sandsteinen und vereinzelt Steinkohleflözen (Geologisches  
134 Landesamt Nordrhein-Westfalen 1980).

135 Die Region liegt in den Einzugsgebieten der Ruhr und der Emscher. Zur Entwässerung der  
136 Region wird der im zentralen Bereich verlaufende Steinbach genutzt. Die Grundwasserleiter  
137 sind vorwiegend mäßig bis sehr gering durchlässige Kluftgrundwasserleiter mit einem  $k_f$ -Wert  
138 von  $1-2 \cdot 10^{-5}$  m/s, welche ein geringes nutzbares Porenvolumen aufweisen, was zu einer  
139 Ansammlung des Grundwassers an den Klüften und Schichtflächen führt (Geologisches  
140 Landesamt Nordrhein-Westfalen 1980).

141

142 **Klimatischer Überblick**

143 Makroklimatisch betrachtet, wird das Untersuchungsgebiet dem nordwestdeutschen  
144 Klimabereich zugeordnet. Diese Klimazone erstreckt sich von der Küste bis zur Eifel und zum  
145 Westerwald sowie bis zur Ostseite des Sauerlandes. Somit befindet es sich im Einflussbereich  
146 maritimer Luftmassen, was sich in den relativ kühlen Sommern und milden Wintern  
147 widerspiegelt. Örtlich können kontinentale Hochdrucklagen mit Winden aus östlicher und  
148 südöstlicher Richtung in den Sommermonaten zu extrem trockenen Perioden führen. In den  
149 Wintermonaten führt diese Wetterlage zu anhaltenden Kälteperioden. Mesoklimatisch  
150 betrachtet befindet sich das Untersuchungsgebiet im Grenzbereich des Klimabezirkes des  
151 Bergischen Landes und dem Klimabezirk des Sauerlandes (Regionalverband Ruhr 2017). Die  
152 Jahresdurchschnittstemperatur – gemessen zwischen den Jahren 1981 und 2010 – liegt bei 10,2  
153 °C. Der mittlere Jahresniederschlag beträgt 949 mm. Die mittleren Monatsniederschläge zeigen  
154 ein Maximum im Januar und Dezember sowie in den Sommermonaten Juni, Juli und August.  
155 Der geringste Niederschlag fällt mit 57 mm im April (LANUV NRW 2018). Die zukünftige  
156 Entwicklung der mittleren Jahressumme des Niederschlages sowie der Temperatur für  
157 Deutschland im kurzfristigen Horizont (2021-2050) zeigt keine deutlichen Änderung. Das  
158 Szenario, bei dem wie zum jetzigen Zeitpunkt weiter verfahren wird, zeigt über das Jahr hinaus  
159 einen Anstieg der Niederschlagssumme von 5,0 % sowie einen Anstieg der Jahrestemperatur  
160 von 1,3 °C. Die Prognose für die Jahre 2051 bis 2100 (DWD 2017) sagt einen Anstieg der  
161 Niederschlagssummen von 9,0 % sowie einen Anstieg der Jahrestemperatur von 3,7 °C voraus.  
162 Neben weiteren Faktoren übt die Flächennutzung einen wichtigen Einfluss auf das regionale  
163 Klima aus. Unterschiedliche Flächennutzungen haben verschiedene Rauigkeiten zur Folge,  
164 die das bodennahe Windfeld und den Oberflächenabfluss beeinflussen. Das gesamte  
165 Untersuchungsgebiet ist durch eine hohe Bebauungsdichte geprägt. Es herrscht demzufolge in  
166 dem gesamten Untersuchungsgebiet Innenstadt-, Stadt-, und Stadtrandklima. Lediglich entlang  
167 des Steinbaches sind Grünflächen zu finden, wodurch diese Bereiche durch Park- und  
168 Waldklima geprägt sind. Der Versiegelungsgrad steuert darüber hinaus die lokalen  
169 Wasserhaushaltskomponenten einschließlich der Grundwasserneubildung sowie durch die  
170 Materialeigenschaften die Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit (Regionalverband Ruhr 2017).

171

### 172 **Starkregenereignisse**

173 Eine allgemeine Definition für Starkregenereignisse kann nicht gegeben werden, da die  
174 Niederschlagsmenge an die zutreffende Klimazone gebunden ist (Heyer 1963). Definierte  
175 Grenzwerte eines Niederschlagsereignisses können auf festgelegten Größen, Perzentilwerten  
176 oder auf deskriptiver Statistik basieren (Manton et al. 2001). Grundlegend kann ein

177 Starkregenereignis jedoch als ein selten auftretender Niederschlag mit zerstörerischer Wirkung  
178 definiert werden. Es kann infolge dessen zu einem schnellen Anstieg und Abfließen des  
179 Hochwassers oder zu Überschwemmungen kommen. Letztere gehen häufig mit Bodenerosion  
180 einher (Bender et al. 2012). Die Auswirkungen sind dabei abhängig von der Siedlungsdichte,  
181 der Infrastruktur, der Bodenbeschaffenheit, Topographie sowie Geometrie des  
182 Einzugsgebietes, der vorhandenen Fließwege und Retentionsräume. Gebiete mit einer höheren  
183 Siedlungsdichte sind daher öfter von verheerenden Auswirkungen betroffen als Gebiete, die  
184 naturbelassen sind. Zwischen 2002 und 2017 verursachten Starkregenereignisse in Deutschland  
185 Schäden von insgesamt 6,7 Milliarden Euro. Am stärksten betroffen waren die Städte Münster,  
186 Herne, Passau und Steinfurt (GDV 2019).

187

188 Allgemein gilt jedoch, dass Starkregenereignisse nach ihrer Intensität in verschiedenen  
189 Zeitintervallen über einen bestimmten Zeitraum definiert werden. Die unterschiedlichen  
190 Niederschlagsmengen werden entweder in  $l/m^2$  oder in mm angegeben. Dabei gilt: 1  $l/m^2$   
191 entspricht 1 mm (Bender et al. 2012). Der Deutsche Wetterdienst (DWD) definiert  
192 Starkregenereignisse in drei verschiedenen Kategorien, die in der Tabelle 1 aufgelistet sind  
193 (DWD 2020).

194 Starkregenereignisse können verheerende Auswirkungen haben, da sowohl die Intensität als  
195 auch der Ort des Auftretens nur kurzfristig vorhersehbar sind. Teilweise kann eine genaue  
196 Eingrenzung des Auftretens sogar erst im Nachhinein getroffen werden. Eine andere  
197 Möglichkeit der Vorhersage ist mit Hilfe von Gefahrensimulationen möglich (BBK 2015).

198 Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass Starkregenereignisse überall, in jeder Region, auftreten  
199 können. Hinsichtlich der Verteilung von Starkregenereignissen lassen sich jedoch innerhalb  
200 von Deutschland Unterschiede erkennen. Ein erhöhtes Gefährdungspotential durch Starkregen  
201 liegt insbesondere in den südlichen Teilen der Bundesländer Baden-Württemberg und Bayern.  
202 Hier sind besonders das Alpenvorland und die Region entlang des Oberrheingraben  
203 hervorzuheben. Außerdem zeigen die Regionen im Osten Deutschlands rund um das  
204 Bundesland Sachsen und südliche Teile von Brandenburg größere Niederschlagshöhen.  
205 Hervorzuheben ist außerdem ein erhöhtes Gefährdungspotential von Ballungsräumen wie dem  
206 Ruhrgebiet, Hamburg oder Frankfurt am Main (BBK 2015).

207 Als ein Grund für die beobachtete Häufung von Starkregenereignissen kann die durch den  
208 Klimawandel steigenden Durchschnittstemperaturen genannt werden. Diese Hypothese ist  
209 dadurch begründet, dass bei höheren Temperaturen der Sättigungsdampfdruck des  
210 Wasserdampfes zunimmt und so ein erhöhtes Wasserdampf-vorkommen für die Bildung von

211 Niederschlag zur Verfügung steht. Der Zusammenhang zwischen Temperaturanstieg und  
212 erhöhtem Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre ist nach Clausius-Clapeyron (Stocker et al.  
213 2013) erwiesen. Ob ein erhöhter Wasserdampfgehalt auch zeitgleich zu erhöhter  
214 Niederschlagsbildung führt, kann zum jetzigen Zeitpunkt nicht eindeutig nachgewiesen  
215 werden, da der Zusammenhang dieser beiden Aspekte wesentlich komplexer ist. Eine  
216 bedeutende Rolle spielt dabei vor allem, ob es überhaupt zur einer Niederschlagsbildung kommt  
217 (DWD 2017).

218 In den letzten Jahren waren viele Städte und Gemeinden von Starkregenereignissen betroffen.  
219 Besonders in urbanen Räumen besteht ein erhöhtes Gefährdungspotential. Ein erhöhter  
220 Versiegelungsgrad und immer weniger unbebaute Flächen können zukünftig zu einem immer  
221 größer werdenden Problem führen. Ein Vergleich zwischen den Abflussverhältnissen  
222 versiegelter und unversiegelter Flächen zeigt eine deutlich messbare Diskrepanz und ein  
223 Ungleichgewicht zwischen Verdunstung, Versickerung und Oberflächenabfluss. Bei einem  
224 anthropogen unbeeinflussten Wasserkreislauf herrscht ein Gleichgewicht zwischen  
225 Verdunstung, Versickerung und Oberflächenabfluss, 40 % des Niederschlages verdunsten,  
226 50 % versickern (25 % Oberflächenversickerung und 25 % Tiefenversickerung) und tragen so  
227 zur Grundwasserneubildung bei und nur 10 % des gesamten Niederschlages fließen ab. Bei  
228 versiegelten Flächen ist das Verhältnis deutlich verschoben. Hier sind es 30 % Verdunstung,  
229 15 % Versickerung (10 % Oberflächenversickerung und 5 % Tiefenversickerung) und 55 %  
230 Oberflächenabfluss (Benden 2014).

231

## 232 **Methodik**

233 Die Modellierung der oberirdischen Abflüsse von Starkregenereignissen basiert auf einem  
234 digitalen Geländemodell des Untersuchungsgebietes mit einer Rasterweite von 1 m  
235 bereitgestellt durch das Amt für Bodenmanagement und Wirtschaftsförderung der Stadt Witten.  
236 Im Zuge einer im Gebiet durchgeführten Kartierung konnten Fließhindernisse wie  
237 beispielsweise Mauern, Hofeinfahrten und Bordsteine aufgenommen werden, die die  
238 Fließwege des Niederschlagswassers beeinflussen und im Geländemodell nur unzureichend  
239 berücksichtigt werden. Für die weitere Verwendung der Daten wurde daraus ein eingabefähiges  
240 Raster erzeugt. Alle Datensätze sind in dem Koordinatensystem ETRS 1989 UTM Zone 32N  
241 dargestellt. Als Referenzwert für eine Niederschlagsganglinie dient das Niederschlagsereignis  
242 vom 20. Juni 2013 mit einer Gesamtniederschlagsmenge von  $73 \text{ l/m}^2$  in zwei Stunden. Daraus  
243 wurde die Niederschlagsmenge von  $36 \text{ l/m}^2$  für eine Stunde interpoliert und als Referenzwert  
244 benutzt. Dieser Wert wurde mit den Niederschlagsmengen für die Dauerstufe von einer Stunde



245 der Rasterdatensätze des Starkregenkatalog Kostra des Deutschen Wetterdienstes verglichen.  
246 Nach den Angaben von 38,3 l/m<sup>2</sup> aus dem Starkregenkatalog KOSTRA des Deutschen  
247 Wetterdienstes (DWD 2018) entspricht dies in etwa einem Ereignis vom 20. Juni 2013, weshalb  
248 er in den folgenden Simulationen verwendet wurde. Außerdem wurde eine weitere Simulation  
249 mit einem Niederschlagswert von 50,6 l/m<sup>2</sup> für ein Wiederkehrintervall von 100 Jahren nach  
250 KOSTRA durchgeführt, um die Auswirkungen eines starken Niederschlagsereignisses zu  
251 zeigen. Die Gangliniendateien wurden extern mit einem Editor erzeugt und sind in der Tabelle  
252 2 dargestellt.

253 Die Modellierung der Niederschlagsereignisse erfolgte mit dem für Esri ArcGIS entwickelten  
254 Erweiterungsprogramm FloodArea (Geomer GmbH 2017) sowie dem vom US-  
255 Verteidigungsministerium entwickelten Modellierungsprogramm Hec-Ras (U.S. Army Corps  
256 of Engineers 2015). In dieser Studie wurden auf Basis des beschriebenen Datenmaterials  
257 insgesamt jeweils vier verschiedene Szenarien modelliert. Zum einen zwei Modellierungen mit  
258 unterschiedlichen Niederschlagsganglinien mit den bestehenden Gebäuden und zum anderen  
259 zwei Modellierungen mit unterschiedlichen Niederschlagsganglinien mit einem zusätzlichen  
260 Gebäude im Retentionsraum. Die Bezeichnungen der unterschiedlichen Szenarien sind in  
261 Tabelle 3 erläutert.

262

## 263 **Ergebnisse und Diskussion**

264 Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse der mit FloodArea und Hec-Ras modellierten  
265 Überschwemmungsflächen. Alle Gefahrenkarten zeigen – zur verbesserten Visualisierung der  
266 Wasserstände nach einem Starkregenereignis – die maximal erreichten  
267 Überschwemmungstiefen in Metern über der Geländeoberkante. Die Überschwemmungshöhen  
268 werden in acht Kategorien unterteilt, die in den Farben hellgrün bis dunkelblau dargestellt sind.  
269 Die Aufteilung erfolgt dabei manuell mit Hilfe des Histogramms, um eine möglichst detaillierte  
270 Karte darstellen zu können.

271 Allgemein lässt sich auf allen Karten – unabhängig von dem verwendeten Programm und der  
272 Niederschlagsmenge – erkennen, dass sich der Bereich mit der größten  
273 Überschwemmungshöhe im Steinbachtal befindet. Weitere Bereiche mit erhöhten  
274 Wasserständen von über 1,5 m ü. GOK liegen im westlichen und nördlichen Teil des  
275 Untersuchungsgebietes.

276 Ein Vergleich der modellierten Überschwemmungshöhen zeigt jedoch deutliche  
277 programmspezifische Unterschiede. Die mit FloodArea erstellten Gefahrenkarten zeigen  
278 allgemein höhere Wasserstände im Vergleich zu der Modellierung mit Hec-Ras. Bei einem

279 einständigen Niederschlag von 38,3 mm sind maximale Überschwemmungshöhen von 8,0 m  
280 ü. GOK in den mit FloodArea modellierten Karten (Szenario F1) zu finden, während die mit  
281 Hec-Ras modellierten Gefahrenkarten (Szenario H1) maximale Wasserstände von nur 5,8 m ü.  
282 GOK aufweisen. Auch bei einem einständigen Starkregenereignis von 50,6 mm sind die  
283 maximalen Wasserstände in der Modellierung mit FloodArea höher (Szenario F2). Die  
284 modellierten Ergebnisse mit FloodArea mit Überschwemmungshöhen von teilweise bis zu 8 m  
285 (F1), bzw. 10 m (F2) ü. GOK entsprechen in etwa der Höhe eines 3- bis 4-stöckigen Hauses. In  
286 der Realität sind Überschwemmungshöhen eines solchen Ausmaßes nur schwer vorstellbar. Die  
287 erhöhten Wasserstände können darauf zurückgeführt werden, dass FloodArea nicht in dem  
288 Maße wie Hec-Ras, die Möglichkeit bietet, Randbedingungen zu setzen. Zusätzlich ist auch  
289 eine Eingabe der Durchlässigkeit des Untergrundes nicht möglich. Bei der Eingabe von  
290 Randbedingungen könnten Zu- und Abflüsse in bzw. aus dem Untersuchungsgebiet  
291 berücksichtigt werden. Ohne diese genauen Angaben liefert das Modell keine sinnvollen  
292 Ergebnisse, da sich das gesamte Niederschlagswasser im Gebiet akkumuliert. Die mit Hec-Ras  
293 modellierten Wasserstände zeigen Werte von maximal 5,8 m. Auch Überschwemmungshöhen  
294 dieser Höhe entsprechen einem 2-stöckigen Haus. Da es sich bei dem zentralen Bereich  
295 allerdings um einen morphologisch wesentlich tiefer gelegenen Bereich handelt, sind  
296 Wasserstände einer solchen Größenordnung durchaus vorstellbar. Die Senke zeigt  
297 Höhenunterschiede zu den östlichen und westlichen Flanken von 10 m. Die Berücksichtigung  
298 eines Ausflusses im Norden des Gebietes führt demnach zu einem realitätsnahen Modell. Das  
299 Beispiel der Gemeinden Simbach am Inn, Anzenkirchen und Untertürken im Landkreis Rottal-  
300 Inn zeigt, dass solche Werte keinesfalls unrealistisch sind. Am 31. Mai und am 01. Juni 2016  
301 kam es in Folge von Starkregenereignissen zu einem maximalen Wasserstand des Simbachs  
302 von 5,1 m (Hübl et al. 2017).

303  
304 Die Modellierungen mit einem zusätzlichen Gebäude im zentralen Bereich (Szenario F1G und  
305 F2G) zeigen bei den simulierten Ergebnissen mit FloodArea keinen wesentlichen Unterschied  
306 in den Überschwemmungshöhen im Vergleich zu den Modellierungen ohne Bebauung  
307 (Szenario F1 und F2). Die Wasserstände weisen in beiden Szenarien die gleichen Höhen auf.  
308 Zu erwarten wäre hingegen eine Anstauung des Wassers entlang der Außenwände.  
309 Eine Ansammlung des Wassers lässt sich jedoch in den Modellierungsergebnissen des  
310 Programms Hec-Ras erkennen. Bei einer Niederschlagsmenge von 38,3 l/m<sup>2</sup> (Szenario H1G)  
311 liegen die Überschwemmungshöhen bei bis zu 8,2 Metern, bei einer Niederschlagsmenge von  
312 50,6 l/m<sup>2</sup> (Szenario H2G) sogar bei 9,5 Metern.

313 Diese Unterschiede zwischen den verwendeten Programmen zeigen sich auch bei einer  
314 genaueren Betrachtung der Fließrichtung entlang des zusätzlichen Gebäude, welches impliziert  
315 wurde um potentielle Fließwege und deren Auswirkung sowie den Effekt der  
316 Innenraumverdichtung von Städten zu verdeutlichen. Wie in Abbildung 3 sichtbar wird, ist  
317 lediglich eine Veränderung der Fließrichtung bei der Verwendung des Programm Hec-Ras  
318 erkennbar.

319 Generell kann man festhalten, dass sowohl FloodArea als auch Hec-Ras wirksame  
320 Simulationswerkzeuge zur Auswertung und Darstellung unterschiedlicher  
321 Starkregenereignisse sind. Zudem können Fließwege dargestellt werden, die Auswirkung von  
322 Fließhindernissen erstellt werden sowie eine Bewertung von Retentionsflächen, die zur  
323 Versickerung und somit auch zur Grundwasserneubildung beitragen können, modelliert  
324 werden. Besonders zu empfehlen sind diese Techniken nicht nur bei der Durchführung von  
325 Hochwasserschutzstudien in europäischen Klimagebieten. GIS-Techniken eignen sich  
326 besonders in ariden Gebieten, in denen keine geeigneten hydrometeorologischen Daten  
327 verfügbar sind (EZZ 2017). Auch für kleine Kommunen, die nur wenige Informationen  
328 besitzen, bietet diese Methode den Vorteil einen schnellen Überblick über potentielle Hot-Spots  
329 zu erhalten.

330

## 331 **Empfehlungen**

332 Da besonders urbane Räume ein großes Problem bei Starkregenereignissen darstellen und sich  
333 das Untersuchungsgebiet mitten im Stadtgebiet von Witten-Annen befindet, könnten enorme  
334 Wassermengen großen Schaden anrichten. Die Auswirkungen eines Starkregenereignisses sind  
335 abhängig von der Topographie, Morphologie sowie Flächennutzung, Versiegelung und Art der  
336 Bebauung im Einzugsgebiet. Auf unbebauten, unversiegelten und ebenen Flächen hat  
337 Starkregen kaum negative Auswirkungen. Tritt ein Starkregenereignis hingegen in urbanen  
338 Räumen auf, sind enorme Folgen zu erwarten.

339 Mit Hilfe der erstellten Gefahrenkarten und der in der Kartierung dokumentierten  
340 starkregengefährdeten Objekte im Untersuchungsgebiet, lassen sich potentiell stark gefährdete  
341 Bereiche charakterisieren und mögliche Empfehlungen zur Anpassung an die Folgen eines  
342 Starkregenereignisses geben. Besonders betroffen sind in dem Untersuchungsgebiet die  
343 angrenzenden Gebäude des Retentionsraumes, was darauf zurückzuführen ist, dass diese sich  
344 unmittelbar in der Senke angrenzend an den Steinbach befinden. Darüber hinaus zeigt im  
345 nördlichen Bereich des Untersuchungsgebietes das Gebiet ein erhöhtes Potential für  
346 Schadensfälle, die dieses Gebiet eine dichte Bebauung aufweist. Gefährdete Objekte sind

347 vorrangig Gebäude mit ebenerdigen Kellerfenstern und -türen und Garageneinfahrten mit  
348 starkem Gefälle in Richtung von Gebäuden.

349 Die modellierten Szenarien mit FloodArea zeigen maximale Wasserstände von 10 m (F2), die  
350 modellierten Szenarien mit Hec-Ras eine maximale Überschwemmungshöhe von 5,8 m (H2).

351 Die geschätzte Speicherfläche der Retentionsfläche liegt bei ungefähr 130.000 m<sup>2</sup>. Bei einem  
352 Wasserstand von 10 m (F2) ist das eine Wassermenge von 1.300.000 m<sup>3</sup>, bei einer Wasserhöhe  
353 von 5,8 m (H2) von 754.000 m<sup>3</sup>. Eine mögliche Lösung zur Entlastung des öffentlichen  
354 Kanalnetzes und des privaten Grundwasserentwässerungssystems (Mulden, Gründächer etc.)  
355 bieten Retentionsflächen. Im Untersuchungsgebiet stellt der zentrale Bereich um das  
356 Steinbachtal die Eigenschaften eines Retentionsraumes (Bodenstruktur, hydraulische und  
357 transportrelevante Eigenschaften) dar. Die durchgeführten Modellierungen zeigen in diesem  
358 Senkenbereich eine erhöhte Akkumulation des Niederschlagswassers. Der zentrale Bereich  
359 bietet den Vorteil fehlender Bebauung. Bei großen Überschwemmungsflächen könnten jedoch  
360 auch an den angrenzenden Gebäuden Schäden entstehen. Da viele Gebäude nahe des  
361 Retentionsraumes ebenerdige Kellerfenster und -türen aufweisen, sollten dort  
362 Anpassungsmaßnahmen getroffen werden. Eine solche könnte beispielsweise der Einbau  
363 wasserdichter und druckwiderstehender Fenster und Türen sein. Ebenso zu empfehlen ist eine  
364 vollständige Abdichtung der Außenwände des Gebäudes sowie der Einbau einer  
365 Rückstausicherung mit einer regelmäßigen Wartung, sollten sich die angeschlossenen  
366 Hausanschlüsse unterhalb der Rückstauenebene befinden (BBSR 2018). Außerdem können schon  
367 kleine Senken, in denen das Niederschlagswasser gesammelt werden kann auf privaten  
368 Grundstücken in Kombination mit weiteren Maßnahmen zur Minimierung des  
369 Niederschlagswassers beitragen. Die durchgeführten Modellierungen zeigen allerdings, dass in  
370 dem zentralen Bereich die Wasserstände so hoch sind, dass kleine Senken in diesem Gebiet  
371 nicht ausreichen würden. Auch der vorhandene Retentionsraum reicht je nach Intensität und  
372 Dauer des Starkregenereignisses möglicherweise nicht aus. Demzufolge müssen weitere  
373 Maßnahmen ergriffen werden. In erster Linie sollte bei der zukünftigen Raum- und Bauplanung  
374 stets auf eine auf Starkregen angepasste Stadtentwicklung geachtet werden. Dabei spielt der  
375 Versiegelungsgrad eine große Rolle. Eine Verminderung der abflusswirksamen Flächen durch  
376 geeignete Dachkonstruktionen ist ebenso zu empfehlen. Dabei sollten Grün- oder  
377 Retentionsdächer als Zwischenspeicher des Niederschlagswassers dienen. Das verwendete  
378 Substrat wirkt dabei als Puffer für den Niederschlag, wodurch der direkte Abfluss in die  
379 Kanalisation bei Gründächern um bis zu 50 %, bei Retentionsdächern sogar bis zu 100 %  
380 reduziert werden kann (BBSR 2018). Dafür müsste man allerdings abschätzen, wie viele der

381 vorhandenen Dächer sich als Grün- bzw. Retentionsdächer eignen. Die gesamte Fläche des  
382 Untersuchungsgebietes beläuft sich auf 1,8 km<sup>2</sup>. Der geschätzte prozentuale Anteil der Dächer  
383 in dem Gebiet liegt bei 30 %, was einer Fläche von 540 m<sup>2</sup> entspricht. Geht man nun davon  
384 aus, dass sich 25 % der vorhandenen Gebäude dafür eignen und eine Wasserhöhe von 20 cm  
385 speichern, könnte ein Niederschlagsvolumen von 27 m<sup>3</sup> von den Grün- und Retentionsdächern  
386 aufgenommen werden. Dies entspricht allerdings nur 0,02 % des Speichervolumens des  
387 gesamten Retentionsraumes und würde demnach nicht wesentlich zur Reduktion des  
388 Niederschlagswassers beitragen. Zudem stellen Grün- und Retentionsdächer lediglich eine  
389 Komponente da. Es werden darüber hinaus temporäre Notwasserwege sowie Retentionsräume  
390 benötigt, um einen Beitrag zur Abpufferung der Abflussspitze zu leisten.

391 Als zusätzliche Maßnahme sollte eine Errichtung weiterer Retentionsflächen in Betracht  
392 gezogen werden. Abbildung 4 zeigt die Standorte möglicher weiterer Retentionsräume sowie  
393 deren Einzugsgebiete. Die Richtungen des Oberflächenabflusses sind zudem mit Pfeilen  
394 gekennzeichnet. Es eignen sich besonders multifunktionale Retentionsflächen, weil sie sowohl  
395 als temporärer Speicher des Niederschlagswassers dienen, als auch weitere  
396 Nutzungsmöglichkeiten bieten. Ein möglicher Bau eines multifunktionalen  
397 Retentionsbereiches könnte, wie in Abbildung 4 dargestellt, umgesetzt werden. Die Auswahl  
398 dieser Bereiche erfolgte nach der Möglichkeit einer temporären Speicherung des  
399 Niederschlagswassers sowie deren weitere Nutzungsmöglichkeiten. Da sich für solche  
400 Retentionsräume besonders Grün- und Sportflächen sowie Parkplätze und Freizeitanlagen  
401 eignen, könnte das Gewerbegebiet im nördlichen Teil des Untersuchungsgebietes als  
402 multifunktionaler Retentionsraum genutzt werden (Abb. 4, Retentionsraum 1). Der Zulauf kann  
403 über die bereits existierenden Straßen erfolgen. Die Speicherkapazität dieser Fläche liegt bei  
404 einer Anstauhöhe von 1,5 m bei ungefähr 90.000 m<sup>3</sup>. Die modellierten Gefahrenkarten zeigen  
405 in diesem Gebiet zudem größere Überschwemmungshöhen, was diesen Bereich als Standort  
406 eines Retentionsraumes hervorhebt. Die Errichtung eines weiteren Retentionsraumes in Form  
407 eines Senkungsbereiches könnte nördlich des Steinbachtals auf der Halde der ehemaligen  
408 Zeche Hamburg errichtet werden (Abb. 4, Retentionsraum 2). Die Speicherkapazität dieser  
409 Fläche liegt bei einer Anstauhöhe von 1,5 m bei ungefähr 95.000 m<sup>3</sup>. Empfehlenswert wäre  
410 zudem die Errichtung einer weiteren Retentionsfläche im nordöstlichen Teil des  
411 Untersuchungsgebietes (Abb. 4, Retentionsraum 3). Da in diesem Bereich eine hohe  
412 Gebäudedichte vorzufinden ist, kann die Errichtung einfacher Retentionsbereiche in Form von  
413 Senken im großen Format nicht umgesetzt werden. Hier ergibt sich lediglich die Möglichkeit,  
414 auf privaten Grundstücken Senken, in denen sich das Niederschlagswasser sammeln kann, zu

415 errichten. Geht man davon aus, dass insgesamt 20 Mulden errichtet werden mit einer  
416 Speicherkapazität von 10 m<sup>3</sup>, kommt man in diesem Bereich auf ein zusätzliches  
417 Speichervolumen von 200 m<sup>3</sup>.

418 Der Vergleich mit den geschätzten Wassermengen von 1.300.000 m<sup>3</sup> (Szenario F2), bzw. von  
419 754.000 m<sup>3</sup> (Szenario H2) zeigt, dass auch bei Errichtung von weiteren Retentionsflächen nicht  
420 das gesamte Niederschlagswasser gespeichert werden kann, ein verzögernder Puffereffekt kann  
421 allerdings auf diese Art erreicht werden.

422 Eine weitere Möglichkeit können unterirdische Speicherbecken sein. Ein Vorteil dieser Becken  
423 ist, dass das gespeicherte Wasser beispielsweise zur Gartenbewässerung genutzt werden kann  
424 (BBSR 2018).

425  
426 Die in dieser Studie verwendeten Methoden lassen sich auch auf andere Gebiete übertragen und  
427 bilden so mit Blick auf die sich in Zukunft häufenden Starkregenereignisse eine geeignete  
428 Möglichkeit, vorab Vorsichtsmaßnahmen einzuleiten und Schäden so zu minimieren.  
429 Besonders zu empfehlen sind diese Techniken nicht nur bei der Durchführung von  
430 Hochwasserschutzstudien in europäischen Klimagebieten – GIS-Techniken eignen sich  
431 besonders in ariden Gebieten, in denen keine geeigneten hydrometeorologischen Daten  
432 verfügbar sind (Ezz 2017). Für zukünftige Überlegungen sollte außerdem die  
433 Grundwasserneubildung in Betracht gezogen werden. Eine Absenkung der  
434 Grundwasseroberfläche würde großen Einfluss auf die angrenzenden Ökosysteme haben  
435 (Mosbrugger et al. 2014). Eine zukünftige Verschärfung des Problems ist mit Blick auf die  
436 steigende Urbanisierung zu erwarten (Miller et al. 2017).

437  
438

## 439 **Literatur**

440

441 Benden, J.(2014): Möglichkeiten und Grenzen einer Mitbenutzung von Verkehrsflächen zum  
442 Überflutungsschutz bei Starkregenereignissen, Diss., RWTH Aachen. S. 60-63, 80-90.  
443 <https://publications.rwth-aachen.de/record/459468/files/5248.pdf>, Zugriffen: 20. Mai  
444 2019

445

446 Bender, S., Schaller, M. (2012): Vergleichendes Lexikon, Wichtige Definitionen,  
447 Schwellenwerte, Kenndaten und Indices für Fragestellungen rund um das Thema  
448 „Klimawandel und seine Folgen“.

449 [https://www.climate-service-](https://www.climate-service-center.de/imperia/md/content/csc/lexikon_definitionen_mit_cover.pdf)  
450 [center.de/imperia/md/content/csc/lexikon\\_definitionen\\_mit\\_cover.pdf](https://www.climate-service-center.de/imperia/md/content/csc/lexikon_definitionen_mit_cover.pdf), Zugriffen:  
451 21. April 2020

452

453 Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) (2015): Die unterschätzten  
454 Risiken „Starkregen“ und „Sturzfluten“. Ein Handbuch für Bürger und Kommunen.  
455 [https://www.flussgebiete.nrw.de/system/files/atoms/files/bbk\\_starkregen.pdf](https://www.flussgebiete.nrw.de/system/files/atoms/files/bbk_starkregen.pdf),  
456 Zugegriffen: 2. März 2019  
457

458 Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) (2018): Starkregeneinflüsse auf  
459 die bauliche Infrastruktur.  
460 [https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/Sonderveroeffentlichungen/  
461 2018/starkregeneinfluesse-dl.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/Sonderveroeffentlichungen/2018/starkregeneinfluesse-dl.pdf?__blob=publicationFile&v=3), Zugegriffen: 18. Mai  
462 2019  
463

464 Deutscher Wetterdienst (2020): Niederschlag.  
465 [https://www.dwd.de/DE/wetter/warnungen\\_aktuell/kriterien/warnkriterien.html](https://www.dwd.de/DE/wetter/warnungen_aktuell/kriterien/warnkriterien.html)  
466 Zugegriffen: 18. Februar 2019  
467

468 Deutscher Wetterdienst (2017): Erste hydro-klimatologische Einordnung der Starkregen und  
469 Dauerregen in Deutschland zum Ende eines sehr nassen Juli 2017.  
470 [https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/niederschlag/20170728\\_hinte  
471 rgrundbericht\\_dauerregennjulideutschland.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/niederschlag/20170728_hintergrundbericht_dauerregennjulideutschland.pdf?__blob=publicationFile&v=2),  
472 Zugegriffen: 9. Mai 2019  
473

474 Deutscher Wetterdienst (2017): Nationaler Klimareport  
475 [https://www.dwd.de/DE/leistungen/nationalerklimareport/download\\_report\\_aufgabe-  
476 3.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=5](https://www.dwd.de/DE/leistungen/nationalerklimareport/download_report_aufgabe-3.pdf?__blob=publicationFile&v=5), Zugegriffen: 20. April 2020  
477

478 Deutscher Wetterdienst (2018): KOSTRA-DWD.  
479 [https://opendata.dwd.de/climate\\_environment/CDC/grids\\_germany/return\\_periods/pre  
480 cipitation/KOSTRA/KOSTRA\\_DWD\\_2010R/](https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/return_periods/precipitation/KOSTRA/KOSTRA_DWD_2010R/) Zugegriffen: 2. März 2019  
481

482 Ezz, H.: Integrating GIS and HEC-RAS to model Assiut plateau runoff. The Egyptian Journal  
483 of Remote Sensing and Space Science 21, p. 219-227 (2017)  
484

485 Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. GDV (2019): Von 2002 bis 2017:  
486 Deutschlandweit 6,7 Milliarden Euro Starkregen-Schäden.  
487 [https://www.gdv.de/de/themen/news/von-2002-bis-2017--deutschlandweit-6-7-  
488 milliarden-euro-starkregen-schaeden--52762](https://www.gdv.de/de/themen/news/von-2002-bis-2017--deutschlandweit-6-7-milliarden-euro-starkregen-schaeden--52762), Zugegriffen: 21. April 2020  
489

490 Geisel, A. (2016): Ergebnisprotokoll der 86. Umweltministerkonferenz am 17. Juni 2016 in  
491 Berlin. Seite 64. [https://www.umweltministerkonferenz.de/documents/umk-  
492 protokoll\\_juni\\_2016\\_1522236592.pdf](https://www.umweltministerkonferenz.de/documents/umk-protokoll_juni_2016_1522236592.pdf), Zugegriffen: 7. Mai 2019  
493

494 Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen: Geologische Karte von Nordrhein-Westfalen  
495 1:25000 - Erläuterungen 4510 Witten. S. 13-17, Krefeld (1980)  
496

497 GEOMER GMBH (2017): Flood-Area<sup>HPC</sup>-Desktop  
498 <https://www.geomer.de/produkte/software/floodarea/index.html>, Zugegriffen, 28. Mai  
499 2019  
500

501 GERICS (Climate Service Center Germany) (2018): Starkregen und Sturzfluten. Gut  
502 vorbereitet – besser geschützt.  
503 [https://www.gerics.de/imperia/md/content/csc/gerics/gerics\\_bleckede\\_flyer\\_starkrege](https://www.gerics.de/imperia/md/content/csc/gerics/gerics_bleckede_flyer_starkregen_druckversion_4-seitig.pdf)  
504 [n\\_druckversion\\_4-seitig.pdf](https://www.gerics.de/imperia/md/content/csc/gerics/gerics_bleckede_flyer_starkrege_n_druckversion_4-seitig.pdf), Zugegriffen: 2. Juli 2019  
505

506 Henningsen, D.: Einführung in die Geologie der Bundesrepublik Deutschland. 3., neu  
507 bearbeitete Aufl., Stuttgart (1986)  
508

509 Heyer, E.: Witterung und Klima. Eine allgemeine Klimatologie. S. 174-175; B. G. Teubner  
510 Verlagsgesellschaft, Leipzig (1963)  
511

512 Hübl, J., Heiser M., Braitto, S., Tschärner, S., Kuntner, K., Prenner, D., Falkensteiner, M.,  
513 Rabanser, E.: Ereignisdokumentation und Ereignisanalyse 2016 Rottal-Inn, IAN Report  
514 180, Band 2: Ereignisanalyse Simbach; Institut für Alpine Naturgefahren, Universität  
515 für Bodenkultur, Wien (2017)  
516

517 LANUV NRW (2018): Klimaatlas NRW. <http://www.klimaatlas.nrw.de/karte-klimaatlas>,  
518 Zugegriffen: 18. Februar 2019  
519

520 Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e. V. (2012): Wie viel Fläche ist versiegelt?.  
521 <https://www.ioer-monitor.de/ergebnisse/analyseergebnisse/bodenversiegelung/>  
522 Zugegriffen: 6. Mai 2019  
523

524 Manton, M. J., Della-Marta, P. M., Haylock, M. R., Hennessy, K. J., Nicholls, N., Chambers,  
525 L. E., Collins, D.A., Daw, G., Finet, A., Gunawan D., Inape, K., Isobe, H., Kestin, T.  
526 S., Lefale, P., Leyu, C. H., Lwin, T., Maitrepierre, L., Ouprasitwong, N., Page, C. M.,  
527 Pahalad, J., Plummer, N., Salinger, M. J., Suppiah, R., Tran, V. L., Trewin, B., Tibig, I.  
528 & Yee, D.: Trends in extreme daily rainfall and temperature in southeast Asia and the  
529 South Pacific: 1961–1998, p. 269-284. International Journal of Climatology (2001)  
530

531 Miller, J. D., Hutchins, M.: The impacts of urbanisation and climate change on urban flooding  
532 and urban water quality: A review of the evidence concerning the United Kingdom, p.  
533 346. Journal of Hydrology: Regional Studis (2017)  
534

535 Mosbrugger, V., Brasseur, G., Schaller, M., und Stirnbnry, B.: Klimawandel und Biodiversität:  
536 Folgen für Deutschland. S. 432.; Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt (2014)  
537

538 Porth, M., Schüttrumpf, H.: Wasser, Energie und Umwelt. Aktuelle Beiträge aus der Zeitschrift  
539 Wasser und Abfall I. S. 21 ff.; Springer Verlag, Wiesbaden (2017)  
540

541 Regionalverband Ruhr (2017): Klimaanalyse Stadt Witten.  
542 [https://www.witten.de/fileadmin/user\\_upload/Dokumente/sta61/Klimaanalyse\\_Stadt](https://www.witten.de/fileadmin/user_upload/Dokumente/sta61/Klimaanalyse_Stadt_Witten_Nov2007_-_Erlaeuterungsbericht.pdf)  
543 [Witten\\_Nov2007 - Erlaeuterungsbericht.pdf](https://www.witten.de/fileadmin/user_upload/Dokumente/sta61/Klimaanalyse_Stadt_Witten_Nov2007_-_Erlaeuterungsbericht.pdf), Zugegriffen: 18. Februar 2019  
544

545 Stadt Dortmund, Stadtentwässerung (2014): Handlungsstrategie für den Umgang mit  
546 Starkregenereignissen.  
547 [https://www.dortmund.de/media/p/stadtentwaesserung/downloads\\_stadtentwaesserung](https://www.dortmund.de/media/p/stadtentwaesserung/downloads_stadtentwaesserung/Handlungsstrategie_Starkregen.pdf)  
548 [/Handlungsstrategie\\_Starkregen.pdf](https://www.dortmund.de/media/p/stadtentwaesserung/downloads_stadtentwaesserung/Handlungsstrategie_Starkregen.pdf), Zugegriffen: 18. Mai 2019  
549



- 550 Stadt Köln (2017): MURIEL – Multifunktionale Retentionsflächen. Teil 3: Arbeitshilfe für  
551 Planung, Umsetzung und Betrieb.  
552 [https://www.steb-koeln.de/Redaktionell/ABLAGE/Downloads/Broschüren-](https://www.steb-koeln.de/Redaktionell/ABLAGE/Downloads/Broschüren-Veröffentlichungen/Gebäudeschutz/MURIEL-Multifunktionale-Retentionsflächen.pdf)  
553 [Veröffentlichungen/Gebäudeschutz/MURIEL-Multifunktionale-](https://www.steb-koeln.de/Redaktionell/ABLAGE/Downloads/Broschüren-Veröffentlichungen/Gebäudeschutz/MURIEL-Multifunktionale-Retentionsflächen.pdf)  
554 [Retentionsflächen.pdf](https://www.steb-koeln.de/Redaktionell/ABLAGE/Downloads/Broschüren-Veröffentlichungen/Gebäudeschutz/MURIEL-Multifunktionale-Retentionsflächen.pdf), Zugegriffen: 23. Mai 2019  
555
- 556 STADT WITTEN (2016): Bevölkerung.  
557 <https://www.witten.de/wirtschaftsstandort/der-standort/strukturdaten/bevoelkerung/>  
558 [Zugegriffen: 18. Februar 2019](https://www.witten.de/wirtschaftsstandort/der-standort/strukturdaten/bevoelkerung/)  
559
- 560 Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauel, A., Xia, Y.,  
561 Bex, V., Midgley, P.M.: Climate Change 2013: The Physical Science Basis.  
562 Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the  
563 Intergovernmental Panel on Climate Change, p. 224. Cambridge University Press,  
564 Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA (2013)  
565
- 566 U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (2015): HEC-RAS.  
567 <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>, Zugegriffen: 30. Mai 2019