



Behörde für Umwelt,
Klima, Energie und
Agrarwirtschaft



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Fakultät Life Sciences

**Kartografische Dokumentationsformen von Starkregenereignissen und ihre
Weiterentwicklungsmöglichkeiten zur Prävention von Gefahren am Beispiel der
Freien und Hansestadt Hamburg**

Bachelorarbeit

Studiengang: Umwelttechnik (B.Sc.)

Vorgelegt von

Maximilian Feddermann



Hamburg

am 27. August 2020

1. Gutachter: Prof. Dr. Jörn Einfeldt
2. Gutachter: Dipl. Ing. Frank Nohme

Die Abschlussarbeit wurde betreut und erstellt in Zusammenarbeit mit dem Referat Grundsatz, Wasserwirtschaftliche Grundlagen, Informationssysteme und Hochwasserschutz der Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft und der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser.

I Inhaltsverzeichnis

I Inhaltsverzeichnis.....	II
II Abbildungsverzeichnis	III
III Abkürzungsverzeichnis.....	V
IV Tabellenverzeichnis	V
Zusammenfassung	VII
Abstract	VIII
1 Einleitung	1
1.1 Zielsetzung dieser Arbeit	1
2 Theoretische Grundlagen.....	2
2.1 Definition Regen	2
2.2 Messung von Niederschlägen	3
2.2.1 Niederschlagssammler	4
2.2.2 Radarmessung.....	4
2.2.3 KOSTRA-DWD-Rasterdaten des DWD	5
2.2.4 Routineverfahren RADOLAN des DWD	6
2.3 Definition Starkregen	6
2.4 Bewertungsmethoden für Starkregen – Starkregenindex	7
2.4.1 Verfahren nach Grisa	8
2.4.2 Verfahren nach Schmitt	8
2.4.3 Verfahren in der Emscher-Lippe-Region	9
2.4.4 Verfahren nach Mudersbach	10
3 Starkregenkarten	11
3.1 Aktuell veröffentlichte Starkregenkarten	13
3.1.1 Inhaltlicher Vergleich aktueller Starkregenereigniskarten	14
3.1.2 Systeme der Bereitstellung	17
3.2 Starkregenhinweiskarte nach LAWA.....	18
3.3 Erweiterungspotenzial	19
3.3.1 Hydrologisch-hydraulische Modellierungsansätze	19
3.3.2 Schadens- und Maßnahmendokumentation	21
3.3.3 Feuerwehreinätze	24
3.3.4 Stations- und radargestützte Regendaten	27
3.4 Besondere Notwendigkeit einer Starkregenhinweiskarte für die Stadt Hamburg	28
3.4.1 Naturnaher lokaler Wasserhaushalt	29
3.4.2 Weitergehender Gewässerschutz	29
3.4.3 Überflutungs- und Binnenhochwasserschutz	30
4 Material und Methoden.....	30
4.1 Senken- und Fließweganalyse zur Bewertung der Aussagekraft von Niederschlagshöhen aus KOSTRA-DWD-2010R und RADOLAN	30
4.1.1 Raumzeitliche Dokumentation der Starkregenereignisse.....	31
4.1.2 Geobasisdaten und Senken- und Fließweganalyse	32
4.1.3 Niederschlagshöhen aus KOSTRA-DWD-2010R und RADOLAN	34
4.1.4 Ermittlung der Einzugsgebiete, der Überflutungsflächen und Berechnung der Einstauhöhen	35
4.1.5 Gegenüberstellung der Niederschlagshöhen aus KOSTRA-DWD-2010R und RADOLAN	36
4.1.6 Interpretation der Ergebnisse	37

4.1.7 Fehlerdiskussion	38
4.2 Prüfung der Voraussetzungen für die Umsetzbarkeit einer erweiterten Starkregenkarte für Hamburg	38
4.2.1 Datengrundlage und weiterführende Informationen	39
4.2.2 Umsetzbarkeit in einer Starkregenkarte	39
4.3.2 Empfehlung	43
5 Schlussfolgerung und Ausblick	44
5.1 Überprüfung der Hypothesen	44
5.1.1 Durch die Aufnahme weiterer Parameter in die bereits bestehenden Starkregenkarten können die Folgen durch Starkregen bundesweit verringert werden	44
5.1.2 Mit den vorhandenen Niederschlagsdaten ist eine valide Aussage über die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Starkregens möglich	45
5.1.3 Für Hamburg dient eine erweiterte Starkregenkarte hinsichtlich des Konflikts.. zwischen Erhalt von Grünflächen und Schaffung von Wohnraum als ein wichtiges ... Sicherheitsinstrument	45
5.2 Sind weitere Verbesserungen und Untersuchungen empfehlenswert?	46
6 Literaturverzeichnis	48
V Anhang	54
1 Liste aller recherchierten Starkregenarten in Deutschland	54
2 Einzugsgebiete und überflutete Flächen	55

II Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Niederschlagssammler nach G. Hellmann (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2018)

Abbildung 2: Aussendung eines elektromagnetischen Signals durch einen Radarturm mit anschließender Reflektion durch einen Regentropfen (DWD, o.J.)

Abbildung 3: Darstellung der Niederschlagshöhen für einen 60-minütigen Starkregen mit der Wiederkehrwahrscheinlichkeit von 100 Jahren (Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen, 2020)

Abbildung 4: Standorte der Radar- und Bodenmessstellen in Deutschland zur Herstellung angeeicherter Radarniederschlagsdaten (DWD, o.J.)

Abbildung 5: Anstieg der Suchanfragen zum Thema "Starkregen" seit 2004. Die Y-Achse gibt den Wert dabei relativ zum Zeitpunkt der meisten Anfragen wieder (Google Trends, 2020)

Abbildung 6: GIS-basierte Darstellungsmethoden einer Starkregengefahrenkarte für den Landkreis Lörrach (Landkreis Lörrach, 2020)

Abbildung 7: Modellierungsansätze zur Darstellung von Starkregenereignissen

Abbildung 8: Schadens- und Maßnahmendokumentation in der Starkregenkarte des Einzugsgebiets Glems auf Starkregen.de (Geomer GmbH, 2020)

Abbildung 9: Starkregenereignis am 30.05.2018 im Rhein-Main-Gebiet (Kutschker, 2018)

Abbildung 10: Resultierende Feuerwehreinsätze aus dem vorangegangenen Starkregenereignis etwa eine Stunde zeitversetzt (Kutschker, 2018)

Abbildung 11: Themenfelder des RISA Strukturplans für den Umgang mit Starkregen (RISA, 2015)

Abbildung 12: Vergleich der Bilanzen: Referenzzustand (links), verbaute Fläche (rechts) (RISA, 2015)

Abbildung 13: Starkregenereignis 1: Mühlenkamp, Ecke Gertigstraße etwa um 17:45 (links; Abendblatt, 2011), Amsinckstraße etwa um 17:35 (rechts; Tagesschau, 2011)

Abbildung 14: Eppendorfer Weg etwa um 19:05 (links; Spiegel, 2016), Am Moorkamp etwa um 18:45 (rechts; Abendblatt, 2016)

Abbildung 15: Am Beckerkamp, Ecke Bornmühlenweg etwa um 17:00 (links), Billwerder Straße, Ecke Heckkatenweg etwa um 17:00 (rechts; Bergedorfer Zeitung, 2018 und 2018a)

Abbildung 16: Digitales Geländemodell auf Basis eines 1x1-Meter-Geländemodells der Hansestadt Hamburg (LGV, 2017)

Abbildung 17: Beispielhafte Verteilung der Abflusswerte (rechts) bei entsprechender Eingabe von Höhenwerten (links) (ArcGIS, 2016)

Abbildung 18: Ausschnitt einer Fließweg- und Senkenanalyse auf Basis eines 1x1-Meter-Geländemodells der Hansestadt Hamburg

Abbildung 19: Darstellung eines mit RADOLAN erfassten Niederschlags über dem Raum Hamburg mit einer Auflösung von 1x1 Kilometer (links), Darstellung eines Niederschlags aus KOSTRA-DWD-2010R mit einer Auflösung von 67x67 Kilometer über dem Raum Hamburg (rechts)

Abbildung 20: Einzugsgebiet aller relevanten Senken, die zur Überflutung in der Amsinckstraße 2011 beitragen (rechts), Bestimmung der überfluteten Flächen mittels des Vermessungswerkzeugs des Hamburger Geoportals (links)

Abbildung 21: Die GIS-basierte Bewertungsplattform von Hamburg Wasser zeigt das Starkregenereignis vom 27.08.2019 mit einem Höchstwert von SRI 8 über Hamburg (Hamburg Nord) für einen Niederschlagszeitraum von 15 Minuten (Hamburg Wasser, 2019)

Abbildung 22: Städtische Erfassungsmaske des "Melde-Michels" zur Mitteilung von Schäden in Hamburg (Freie und Hansestadt Hamburg, 2020)

Abbildung 23: Abbildung einer Schadensmeldung in der Isestraße mit Rückmeldung der Stadt und Angabe des Bearbeitungsstatus (Freie und Hansestadt Hamburg, 2020)

III Abkürzungsverzeichnis

DWD	Deutscher Wetterdienst
LAWA	Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser
GDV	Der Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V.
KOSTRA	Koordinierte - Starkniederschlags - Regionalisierungs - Auswertung
GIS	Geografisches Informationssystem
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall
LGV	Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung
HWRM-RL	Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie
SRI	Starkregenindex

IV Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Niederschlagsarten und ihre Erscheinungsformen

Tabelle 2: Klassifizierungsmöglichkeiten für Starkregenindizes von SI 1 bis SI 12 nach Schmitt (Mudersbach et al., 2017)

Tabelle 3: Einteilung der Starkregenindizes nach Krüger und Pfister mit einer Bewertung der Starkregen mit Intensitätsbewertungen (Mudersbach et al., 2017)

Tabelle 4: Starkregenindex nach Mudersbach (Mudersbach et al., 2017)

Tabelle 5: Hintergrundinformationen zur Starkregengefahrenkarte der Stadt Köln (Stadtentwässerungsbetriebe Köln, 2017)

Tabelle 6: Hintergrundinformationen zur Starkregengefahrenkarte der Stadt Gelsenkirchen (Stadt Gelsenkirchen, 2020)

Tabelle 7: Hintergrundinformationen zur Starkregengefahrenkarte der Stadt Oldenburg (Oldb.) (Stadt Oldenburg, 2019)

Tabelle 8: Hintergrundinformationen zur Starkregengefahrenkarte der Stadt Erkrath (Stadt Erkrath, o.J.)

Tabelle 9: Hintergrundinformationen zur Starkregengefahrenkarte der Stadt Ochsenhausen (Stadt Ochsenhausen, 2018)

Tabelle 10: Drei Themenbereiche des Bremer Forschungsprojekts KLAS für ein erfolgreiches Risikomanagement (HSB, 2017)

Tabelle 11: Meldebilder zum Einsatzstichwort "H 1" des Bundeslandes Hessen (Kutschker, 2019)

Tabelle 12: Tabelle zum Starkregenereignis 1

Tabelle 13: Tabelle zum Starkregenereignis 2

Tabelle 14: Tabelle zum Starkregenereignis 3

Tabelle 15: Auswertung Amsinckstraße

Tabelle 16: Auswertung Mühlenkamp

Tabelle 17: Auswertung Eppendorfer Weg

Tabelle 18: Auswertung Am Moorkamp

Tabelle 19: Auswertung Am Beckerkamp

Tabelle 20: Auswertung Heckkatenweg

Tabelle 21: Zusammenfassung der Daten- und Modellierungsgrundlage für eine erweiterte Starkregenkarte für Hamburg

Zusammenfassung

In Deutschland und der Welt werden Starkregenereignisse immer extremer. Experten sehen diese Intensivierung durch den Klimawandel begründet. Um sich in Zukunft an diese Entwicklung anpassen zu können, ist eine detaillierte und flächendeckende Risikokommunikation seitens der Behörden notwendig. Hierfür werden sogenannte Starkregenkarten immer wichtiger, die viele Kommunen, Landkreise und Städte bereits etabliert haben. Sie weisen jedoch in ihrem Informationsgehalt starke Unterschiede auf.

Diese Bachelorarbeit zeigt den aktuellen Stand der Starkregenkarten in Deutschland, vergleicht sie miteinander und bewertet die Möglichkeit der Weiterentwicklung von Starkregenkarten durch die Implementierung zusätzlicher relevanter Informationen wie Schadens- und Maßnahmendokumentationen, Feuerwehreinsätze, hydrologisch-hydraulische Modellierungsansätze sowie die Verwendung von radargestützten Niederschlagsdaten. Dabei wird deutlich, dass alle Informationen zu einer Verbesserung der Kartenwerke beitragen können. Schadens- und Maßnahmendokumentationen führen zur besseren raumzeitlichen Nachvollziehbarkeit der Starkregenereignisse, die Implementierung von Feuerwehreinsätzen legt vulnerable Infrastrukturen offen und hydrologisch-hydraulische Modellierungen lassen realitätsnahe Simulationen von Einstauhöhen zu. Am Beispiel Hamburgs wird die Umsetzbarkeit einer solchen erweiterten Starkregenkarte geprüft. Es zeigt sich, dass fast alle erforderlichen Daten verfügbar und auch anwendbar sind. Bei den Feuerwehreinsätzen ist allerdings anzuführen, dass Feuerwehren auf viele unterschiedliche Registrierungsweisen zurückgreifen. Das erschwert die Identifikation von Schäden, die durch Starkregenereignissen verursacht werden.

Außerdem werden die Regendaten aus den stationsbasierten KOSTRA-DWD-Datenreihen und dem Routineverfahren RADOLAN untersucht und ihre Verlässlichkeit anhand von drei Starkregenereignissen der vergangenen Jahre im Hamburger Raum überprüft. Hierbei werden detaillierte in situ-Aufnahmen der Überflutungen gesammelt, ausgewertet und die zu erkennenden Einstauhöhen mit GIS-basierten Kartenmodellierungen in Verbindung gebracht. Das bedeutet, es werden Fließweg- und Senkenanalysen auf Grundlage eines digitalen Geländemodells erstellt. Auf dieser Basis wird die Niederschlagsmenge, eines Senkenbereichs, aufsummiert. Anschließend werden diese Niederschlagsmengen auf die in den Bildaufnahmen zu erkennenden überflutete Flächen umgerechnet. Damit ist es möglich, die Niederschlagsmengen aus beiden Datenreihen ortsbezogen und systematisch in einen raumzeitlichen Kontext zu bringen. In der Auswertung der Berechnungen zeigt sich, dass in vier von sechs untersuchten Fällen eine Übereinstimmung zwischen den beiden Datenreihen erreicht wird. Lediglich bei Starkregenereignissen seltener Wiederkehrzeiten erweisen sich die KOSTRA-DWD-2010R-Daten in ihrer Aussagekraft begrenzt. Aber auch das Routineverfahren RADOLAN liefert übereinstimmende Ergebnisse mit den in situ-Aufnahmen.

Abstract

In Germany and around the world, heavy rainfalls are becoming more extreme. Experts believe this intensification is due to climate change. In order to be able to adapt to this development in the future, detailed and comprehensive risk communication is important. For this purpose, so-called heavy rain maps are becoming increasingly important. Many municipalities, districts and cities have already established heavy rainfall maps. However, they differ in their information content.

This bachelor thesis presents the current status of heavy rainfall maps in Germany, compares them with each other and evaluates the possibility of further development of heavy rainfall maps by implementing further relevant informations such as image and video documentations, numbers of fire fighting operations, modelling approaches of dewatering capacity and the use of radar-based rain data. It becomes clear that all information can contribute to an improvement of the maps. Documentation of a heavy rainfall leads to a better spatio-temporal traceability, the implementation of fire brigade operation-data exposes vulnerable infrastructures and dewatering capacity modelling allows realistic simulations of water levels. The practicability of an extended heavy rainfall map will be tested using the example of Hamburg in Germany. The result is that almost all of the data is available and applicable. It should be noted that the fire brigades do not always have a standardized way to file their operations. That means each fire brigade operation must be checked individually regarding to a connection to a heavy rainfall.

In addition, the rain data from the station-based KOSTRA-DWD data and the radar-based RADOLAN method will be examined and their reliability will be checked on the basis of three heavy rainfall events in Hamburg over the past years. The detailed in situ images of the floods will be collected and evaluated. The detected heights of the floods will be compared to GIS-based map modelling, which are flow path and sink analyses on the basis of a digital terrain model. With that the amount of rain falling on a catchment area of a sink is added up. This rain quantity is then converted to the flooded area in the image recordings. Thus, it is possible to place the rain quantities from both data series in a spatial-temporal context. The evaluation of the calculations shows that in four out of six investigated cases compliance between the two data series is achieved. The KOSTRA-DWD-2010R data are limited in their validity only in the case of heavy rainfall events of rare return periods. The RADOLAN data also provides results that are consistent with the in situ images.

1 Einleitung

Bei einem Starkregenereignis fielen 2014 in Münster 292 Liter pro Quadratmeter in sieben Stunden (Becker, 2015). In Wuppertal waren es 2018 100 Liter pro Quadratmeter in anderthalb Stunden (Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V., 2019). In beiden Fällen wurden ganze Straßen mitgerissen und Dächer sind unter der Last des Wassers eingestürzt. Innerhalb weniger Minuten entstanden Schäden in Millionenhöhe (Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V., 2019). Zum Vergleich: In den Monaten Mai 2019 bis Mai 2020 lag der deutschlandweite monatliche Durchschnitt bei etwa 66 Litern pro Quadratmeter (Breitkopf, 2020).

Außergewöhnliche Starkregenereignisse geraten gerade in Zeiten des Klimawandels zunehmend in den Fokus der Öffentlichkeit, wie der Wissenschaft, der Behörden und der Politik (Gerz et al., 2019). Auch Regionen abseits von Gewässern sind betroffen, weshalb sich Bundesländer und Kommunen bundesweit gezwungen sehen, sich vor der allseits drohenden Gefahr zu schützen (Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V., 2019; Mischutin et al., 2018).

Die Bund/Länderarbeitsgemeinschaft (LAWA) wurde daher gemäß Beschluss Nr. 10 der 90. Umweltministerkonferenz (UMK, TOP 30) gebeten „[...] zu prüfen, ob bestehende bundesweite Ansätze für eine systematische und gezielte Dokumentation von Starkregenereignissen ausgebaut werden können und wie die Pflege der Dokumentation sichergestellt werden kann (UMK, 2018). Darauf aufbauend sollten durch die LAWA bundesweit abgestimmte Handlungsempfehlungen zur Dokumentation von Ereignissen und damit zum Aufbau einer belastbaren Datengrundlage entwickelt werden“ (UMK, 2018).

1.1 Zielsetzung dieser Arbeit

In dieser Bachelorarbeit soll überprüft werden, ob die Aussagekraft vorhandener Starkregenkarten durch Zusatzinformationen wie Feuerwehreinsätze, Schadens- und Maßnahmen-dokumentationen, hydrologisch-hydraulischer Modellierungen und radargestützten Niederschlagsdaten verbessert werden kann. Auf dieser Basis wird analysiert, welche Potenziale die Stadt Hamburg durch eine erweiterte Nutzung erschließen könnte.

Um die LAWA in ihrer Aufgabe zu unterstützen, wird eingangs das Gefährdungspotenzial von Starkregen beleuchtet, auf bereits vorhandene Erfassungsmöglichkeiten hingewiesen und anschließend die Möglichkeiten der Weiterentwicklung durch zusätzliche Parameter geprüft. Abschließend wird daraus für den Raum Hamburg die Umsetzbarkeit einer solchen Karte geprüft, um realitätsnah neuralgische Punkte in der Infrastruktur antizipieren und offengelegen zu können.

Die im Rahmen dieser Arbeit zu überprüfenden Hypothesen lauten wie folgt:

- Durch die Aufnahme weiterer Parameter in die bereits bestehenden Starkregenkarten können negative Auswirkungen durch Starkregen bundesweit verringert werden.
- Mit den vorhandenen Niederschlagsdaten ist eine valide Aussage über die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Starkregens möglich.
- Für Hamburg dient eine erweiterte Starkregenkarte hinsichtlich des Konflikts zwischen Erhalt von Grünflächen und Schaffung von Wohnraum als ein wichtiges Sicherheitsinstrument

Um beurteilen zu können, welchen Erkenntnisgewinn Starkregenkarten durch die Integration weiterführender Informationen erhalten können, definiert diese Arbeit zunächst ihren theoretischen Rahmen. Daher werden zu Beginn einige grundlegende Begriffe und essenzielle Messmethoden zur Erfassung von Regen im Allgemeinen sowie Starkregen im Besonderen, genauer erläutert. Auf Grundlage dieser Informationen zur Entstehung und Erfassung von Regen- und Starkregenereignissen wird dargelegt, wie diese Daten zu sogenannten Starkregenindizes verarbeitet werden. Diese dürften zukünftig für die Bewertung und Darstellung von Starkregen eine essenzielle Rolle einnehmen. Darauf aufbauend werden aktuell in Deutschland genutzte Starkregenkarten vorgestellt und auf ihre Unterschiede und Gemeinsamkeiten untersucht, um folglich eine potenzielle Optimierung durch die Implementierung weiterführender Informationen vornehmen zu können. Als weiterführende Informationen werden unter anderem radargestützte Niederschlagsdaten genannt. Diese werden im vierten Kapitel mit herkömmlichen stationsbasierten Niederschlagsdaten verglichen und daraufhin geprüft, ob ihre Verwendung ein Informationsgewinn mit sich bringt. Im fünften Kapitel wird eruiert, ob für die Freie und Hansestadt Hamburg aufgrund ihrer besonderen Situation hinsichtlich vieler stark anthropogen veränderter Fließgewässer und des steigenden Versiegelungsgrades im urbanen Raum die Etablierung einer Starkregenkarte inklusive weiterführender Informationen sinnvoll wäre. Daraufaufgehend wird die Umsetzbarkeit einer solchen Karte diskutiert. Abschließend werden die eingangs aufgestellten Hypothesen überprüft, Anstoß für weitere Forschung gegeben und ein abschließendes Fazit formuliert.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Definition Regen

Um das Phänomen des Starkregens verstehen zu können, wird zunächst eine kurze allgemeine Einführung zum Thema Regen gegeben. Der Niederschlag ist nach Definition des Deutschen Wetterdienstes (DWD) eine „Ausscheidung von Wasser aus der Atmosphäre im flüssigen und/oder festen Aggregatzustand, die man am Erdboden messen oder beobachten kann“ (DWD, o.J.). Niederschlag entsteht, wenn feuchte Luft unter ihren Taupunkt abkühlt und als Kondensationsprodukt wieder auf den Boden gelangt (Maniak, 2016). Regenfälle gelten als wichtiger Parameter für das lokale Klima und sind zeitlich und räumlich flexibel (Fabig, 2007). Dabei unterscheidet man zwischen drei Arten des Niederschlags:

Tabelle 1: Niederschlagsarten und ihre Erscheinungsformen

Niederschlagsarten	Erscheinungsbild
Fallender Niederschlag	Regen, Hagel, Schnee, Graupel
Aufgewirbelter Niederschlag	Tau, Reif
Abgelagerter Niederschlag	Nebelniederschläge, Eisablagerungen

Ebenfalls können drei Niederschlagstypen genannt werden, dessen Charakteristiken sich in Niederschlagsdauer und -intensität unterscheiden (Fabig, 2007):

Konvektive Niederschläge entstehen, wenn erwärmte Luft aufsteigt und dabei auf eine kältere, dichtere Luftzone trifft. Dies hat zur Folge, dass die Regenfälle meist nur kurz andauern und begrenzt in ihrer Ausdehnung sind. Ihre Intensitäten reichen von leichten Schauern bis zu Starkregen oder Wolkenbrüchen. Als besonders charakteristisch bei konvektiven Niederschlägen gilt das Auftreten von „Schauerstraßen“, die ihr Niederschlagsgebiet schnell wechseln und überall auftreten können (Baumgartner et al., 1996, Dyck et al., 1995, Umweltbundesamt, 2019). Durch ihre teilweise hohen Intensitäten ist diese Art des Niederschlags verantwortlich für Erosionen im Umfeld des Niederschlagsgebiets (Baumgartner et al., 1996, Dyck et al., 1995).

Orografische Niederschläge oder Stauniederschläge entstehen an Gebirgshängen. Aufsteigende feuchte Luftmassen kühlen sich auf der Luvseite ab und entladen sich als Niederschlag. Die Leeseite hingegen bleibt ohne Regenfall, es entsteht ein Niederschlagsdefizit (Baumgartner et al., 1996, Dyck et al., 1995).

Zyklonale oder advective Niederschläge sind an Kalt- und Warmwetterfronten gebunden. Warme, feuchte Luft weht über die tiefer liegende und schwerere Kaltluft hinweg. Die feuchte Luft kondensiert und bringt ausgedehnte Niederschläge mit sich. Diese sind meist nicht sehr intensiv, aber durch ihre lange Dauer sehr ergiebig. Als Reaktion darauf entstehen an den Kaltfronten Hebungsvorgänge, die wiederum kurz andauern, aber dafür sehr intensiv sein können (Baumgartner et al., 1996, Dyck et al., 1995).

2.2 Messung von Niederschlägen

Schon früh war es für die Menschen wichtig, einen Eindruck über die Mengen an gefallenem Regen in ihrer Region zu gewinnen (Maniak, 2016). So konnte zu starker oder zu geringer Niederschlag, den Ertrag der Landwirte empfindlich beeinträchtigen. Es ist übermittelt, dass Landwirte in Indien bereits um 400 v. Chr. erste Niederschlagsbeobachtungen getätigt haben (Maniak, 2016).

In Deutschland ist seit September 1998 der Deutsche Wetterdienst durch das DWD-Gesetz für die Aufzeichnung und Analyse von Regenereignissen, sowie für die Herausgabe von Warnungen verantwortlich (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, o.J.).

Es folgen zwei allgemeine Erläuterungen zu Registrierungsarten für Niederschläge in Deutschland und jeweils ein Anwendungsbeispiel durch den Deutschen Wetterdienst in Form der KOSTRA-DWD-Rasterdaten und des Routineverfahrens RADOLAN.

2.2.1 Niederschlagssammler

Nachgewiesen sind seit 1247 Regenschauer aus China (Maniak, 2016). Sie ähneln den heute immer noch genutzten Auffangbehältnissen nach G. Hellmann (Fabig, 2007). 1879 ließ G. Hellmann rund 2000 Messstationen für den norddeutschen Raum mit sogenannten Hellmann-Niederschlagssammlern errichten und legte damit den



Abbildung 1: Niederschlagssammler nach G. Hellmann (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2018)

Grundstein für den Beginn der Aufzeichnungen im Jahr 1891

(Fabig, 2007). Die Methodik beruht dabei auf einem Auffangbehältnis, das eine 200 cm² große Öffnung senkrecht zum Himmel besitzt und etwa einen Meter über dem Boden montiert wird, um Messfehler durch Regenspritzer zu vermeiden (Abbildung 1; Malberg, H., 1985).

Der aufgefangene Niederschlag kann im unteren Teil des Gefäßes in Millimetern oder in Liter pro Quadratmeter abgelesen werden. Etwaiger fester Niederschlag wie Schnee oder Hagel wird verlustfrei erwärmt und vermengt. Das Messergebnis wird als Durchschnittswert für das gesamte Beobachtungsgebiet gewertet, wodurch flächendeckende Niederschlagshöhen entstehen (Malberg, 1985).

2.2.2 Radarmessung

Eine alternative Methode zur Erfassung des Niederschlags stellt die Radarmessung dar. Im Gegensatz zur mechanischen Methodik des Niederschlagssammlers handelt es sich beim Regenradar um ein optisches Verfahren der Niederschlagsmessung (Löffler, 2012). Das Radargerät in Form einer Antenne sendet elektromagnetische Wellen in unterschiedlichen Winkeln in die Umgebung (Deutscher Wetterdienst, 2017). Wassertropfen, Hagelkörner oder Schneeflocken reflektieren diese zurück zur Antenne. Die Laufzeit des Empfangssignals lässt Rückschlüsse auf die Entfernung des getroffenen Partikels zu. Die Stärke des reflektierten Echos wiederum beschreibt das Volumen und den Aggregatzustand des getroffenen Teilchens (siehe Abbildung 2). Zusammengefügt ergeben diese Informationen Erkenntnisse über Niederschlagsmengen (Deutscher Wetterdienst, 2017).

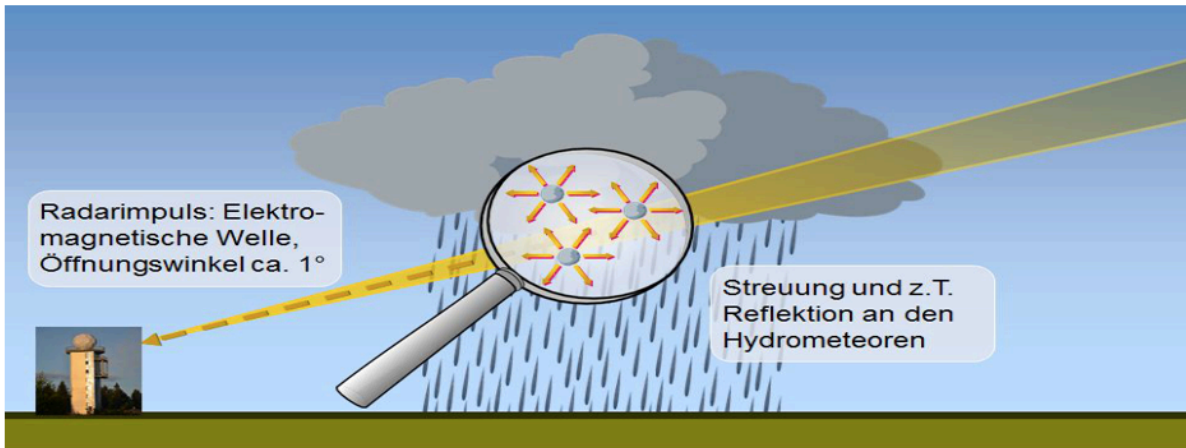


Abbildung 2: Aussendung eines elektromagnetischen Signals durch einen Radarturm mit anschließender Reflektion durch einen Regentropfen (DWD, o.J.)

Angewandt wird dieses Verfahren in Europa allerdings erst seit etwa 40 Jahren, sodass bei langen Zeitreihen (> 40 Jahre) auf Datenmaterial konventioneller Niederschlagsmessung zurückgegriffen werden muss (Seuffert, 2004).

2.2.3 KOSTRA-DWD-Rasterdaten des DWD

In Deutschland werden von etwa 6.500 Niederschlagssammlern 4.500 durch den Deutschen Wetterdienst betrieben (Maniak, 2016). Die daraus erfassten Regenmengen fließen in die KOSTRA-DWD-Rasterdaten (Koordinierte Starkniederschlags-Regionalisierungs-Auswertung; DWD, o.J.). Dort werden sie als statistische Niederschlagshöhen in Abhängigkeit von der Niederschlagsdauer und der Wiederkehrwahrscheinlichkeit bereitgestellt. Das bedeutet, es können für jede Dauerstufe von 5 Minuten bis 72 Stunden die Wiederkehrwahrscheinlichkeiten $T_n = 1$ a bis $T_n = 100$ a ausgewählt werden. Basierend auf dieser Kombination können die entsprechenden Niederschlagshöhen flächendeckend für das Bundesgebiet dargestellt werden. Abbildung 3 visualisiert die statistischen KOSTRA-DWD-Rasterdaten eines 60-minütigen Starkregens mit der Wiederkehrwahrscheinlichkeit $T_n = 10$ a. Die Niederschlagshöhen werden mit einer Auflösung von 67 Quadratkilometern wiedergegeben. Dabei beschreibt die Auflösung die Flächengröße der einzelnen Raster (DWD, o.J.).

Für den Zeitraum von 1951 bis 2010 stehen diese punktuell erfassten Niederschläge flächenbezogen für das gesamte Bundesgebiet zur Verfügung. Häufig dienen die Rasterdaten als Grundlage für Analysen von Gefahrenpotenzialen bei der Dimensionierung wasserwirtschaftlicher Bauwerke (DWD, o.J.).

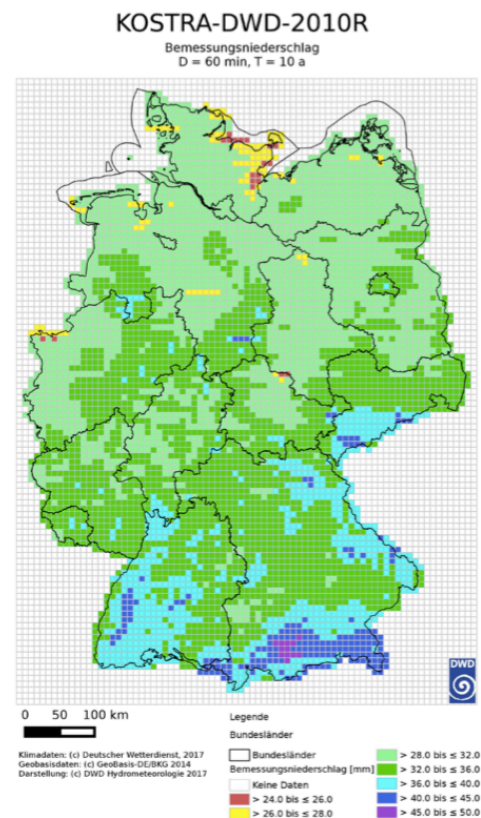


Abbildung 3: Darstellung der Niederschlagshöhen für einen 60-minütigen Starkregen mit der Wiederkehrwahrscheinlichkeit von 100 Jahren (Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen, 2020)

2.2.4 Routineverfahren RADOLAN des DWD

1997 startete das Projekt RADOLAN (Radar-Online-Aneichung) des DWD (DWD, 2018). Hierbei werden durch 17 Radarstandorte und ein zusätzliches Qualitätssicherungsradar zur Eliminierung von Störfaktoren in Hohenpeißenberg, Niederschlagsdaten registriert (Abbildung 4, links; DWD, 2017a; DWD, o.J.). Da mit dem reinen Verfahren der Radarmessung jedoch nicht die direkten bodennahen Niederschlagsmengen erfasst werden, sondern nur die Niederschläge in höheren Atmosphären, werden die Radardaten mit den Daten der Niederschlagssammler zusammengeführt, das heißt sie werden angeeicht (Abbildung 4, rechts). Dies ist für eine quantitative und korrekte radargestützte Niederschlagsauswertung essenziell. Seit 2005 befindet sich das System im laufenden Routinebetrieb und liefert für die Bundesrepublik räumlich und zeitlich hochaufgelöste quantitative Niederschlagsdaten in Echtzeit. Im Vergleich zu den KOSTRA-DWD-Rasterdaten liefert das Routineverfahren also keine statistischen, sondern ereignisbezogene Niederschlagshöhen für das Bundesgebiet. Den Nutzenden stehen somit die Regenmengen für jeden Tag rückwirkend bis 2001 als Stunden- und Tagessummen oder als Echtzeitangabe zur Verfügung (DWD, 2018).

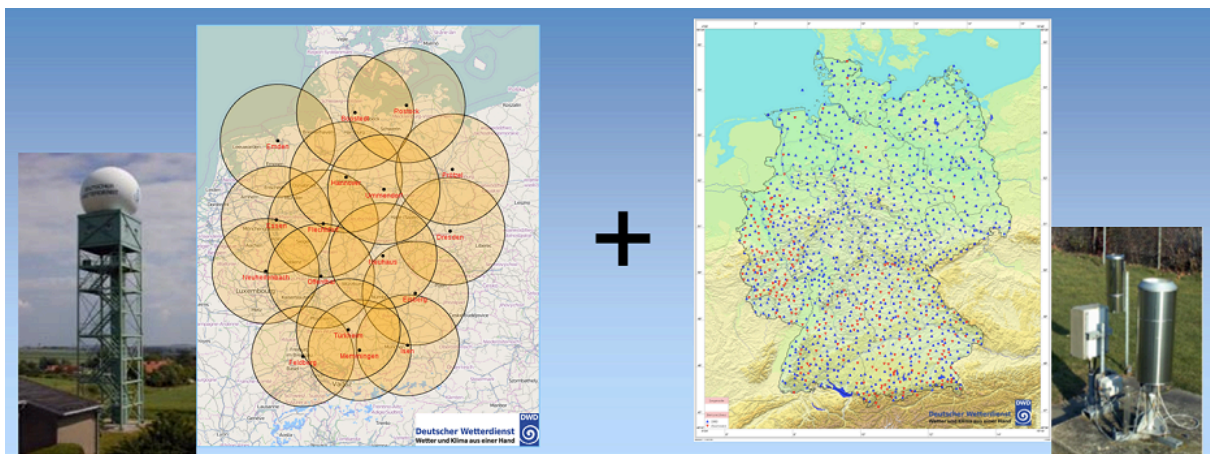


Abbildung 4: Standorte der Radar- und Bodenmessstellen in Deutschland zur Herstellung angeeichter Radarniederschlagsdaten (DWD, o.J.)

Die Zuverlässigkeit des Datenmaterials aus Boden- und Radarmessung ist hinsichtlich der Bewertung von Starkregenereignissen essenziell. Doch wann wird ein normaler Regen zu einem Starkregen?

2.3 Definition Starkregen

Fällt innerhalb kürzester Zeit ungewöhnlich viel Regen, so spricht man von einem Starkregenereignis. Diese sind typisch für die in Kapitel „2.1 Definition Regen“ beschriebenen konvektiven Niederschläge. Sie treten meist in den Sommermonaten auf und bringen Gewitterzellen mit sich. Eine allgemeingültige oder sogar weltweit anerkannte Definition für Starkregen gibt es nicht. Dafür unterscheiden sich die Charakteristiken der Regenereignisse zu sehr durch die Klimazonen (Baumgartner & Liebscher 1996). Hierzulande gehören etwa 10 Prozent der Regenfälle zur Kategorie der Starkregen (Hamburg Wasser, 2020).

Der DWD definiert sogenannte „Warnstufen“ für Regenmengen. Beim Erreichen dieser Grenzwerte erfolgen Wetterwarnungen. Sie sind quantitativ wie folgt benannt (Deutscher Wetterdienst, 2017b):

- Regenmengen ≥ 10 mm / 1 Std. oder ≥ 20 mm / 6 Std. (Warnung vor markantem Wetter)
- Regenmengen ≥ 25 mm / 1 Std. oder ≥ 35 mm / 6 Std. (Unwetterwarnung)
- Regenmengen ≥ 40 mm / 1 Std. oder ≥ 60 mm / 6 Std. (Extremes Unwetter).

Nicht direkt zu Starkregenereignissen zählen Ereignisse, wie Sturzfluten, wild abfließendes Wasser, Überschwemmungen, Überflutungen oder Hochwasser (DWA, 2015). So versteht man unter Sturzfluten einen erhöhten Wasserstand, der auch abseits von Fließgewässern durch ein vorangegangenes starkes, zeitlich begrenztes Niederschlagsereignis entstehen kann und meistens ein Hochwasser zur Folge hat (Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, 2015).

Hochwasser, Überschwemmungen und Überflutungen sind zeitlich begrenzte Überflutungen von Flächen, die in der Regel nicht mit Wasser bedeckt sind. Verursacht wird dies meist durch rasant ansteigende Pegelstände in fließenden oder stehenden Gewässern und haben das Übertreten des Wasser über den Uferrand zur Folge (Umweltbundesamt, 2011; DWD, o.J.).

Auch dem wild abfließenden Wasser geht ein Starkregenereignis voraus und lässt die gefallenen Wassermassen außerhalb von Fließgewässern unkontrolliert in tiefergelegene Ebenen abfließen (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, o.J.a).

2.4 Bewertungsmethoden für Starkregen – Starkregenindex

Starkregenereignisse können in den meisten Fällen durch die Niederschlagsdauer D , die Wiederkehrzeit T_n und die Regenhöhe charakterisiert werden (DWA, 2012). Gerade bei Starkregenereignissen spricht man jedoch auch häufig von sogenannten Starkregenindizes (SRI). Bei den Indizes wird auf Grundlage der Regendauer, der Regenmenge sowie der Wiederkehrzeit eine dimensionslose Kennzahl gebildet, die aufsteigend den Grad der Gefährdung angibt (Mudersbach et al., 2017). Nach Erfahrungen der DWA wird die Verwendung der Indizes im Kontext der Risikokommunikation mit Bürgerinnen und Bürgern für einfacher und verständlicher gehalten und spricht in ihrem DWA-Merkblatt M 119 aus 2016 eine klare Empfehlung zur Verwendung der Indizes aus (Mudersbach et al., 2017). Auch für die bundesweit einheitliche Starkregenkarte ist die Verwendung eines Index ein zentraler Diskussionspunkt, wie in Kapitel „3.2 Starkregenhinweiskarte nach LAWA“ noch ausführlicher beschrieben wird.

Im Folgenden werden die bisher gängigen Ansätze zur Herleitung eines Starkregenindex beschrieben.

2.4.1 Verfahren nach Grisa

2013 formulierte Grisa für die USA einen mathematischen Ansatz, der mittels dimensionsloser Zahl eine Bewertung von Starkregenereignissen ermöglicht (Mudersbach et al., 2017). In Abhängigkeit der statistischen Wiederkehrzeit T_n und der Dauerstufe D wird dieser dimensionslose Index auf Basis des dekadischen Logarithmus berechnet (siehe Gleichung 1). Die Kennzahlen können als Analogie zu Bewertungsmethoden anderer Naturereignisse wie der Beaufort-Skala bei Wind oder der Richter-Skala bei Erdbeben verstanden werden (Mudersbach et al., 2017).

$$SI_{T_n,D} = \left(1 + \frac{\log(T_n)}{\log(2)}\right) \cdot (DAF) \cdot (IAF)$$

$$= \left(1 + \frac{\log(T_n)}{\log(2)}\right) \cdot \left(\frac{h_N(T_n, D)}{h_N(T_n, D = 1 d)}\right) \cdot \left(\frac{h_N(T_n, D)}{h_N(T_n, D = 100 d)}\right)$$

Gleichung 1

mit:

SI	Starkregenindex (kaufmännische Rundung auf Ganzzahl)	[-]
DAF	Dauerstufenanpassungsfaktor	[-]
IAF	Intensitätsanpassungsfaktor	[-]
T_n	Wiederkehrzeit	[a]
h_N	Niederschlagshöhe	[mm]
D	Dauerstufe	[min; h; d]

Mit der Festlegung dieser Faktoren innerhalb der Formel wird eine Normierung der Niederschlagshöhen für Tagessummen ($D = 24$ h) und einer Wiederkehrzeit von 100 Jahren zur Berechnung des Starkregenindex festgelegt. Die möglichen Ergebnisse aus der Gleichung 1 unterteilt Grisa in fünf Gefahrenklassen. Mit „gering“ bis „katastrophal“ werden in diesen Gefahrenklassen die Auswirkungen eines Starkregens bewertet. (Mudersbach et al., 2017).

2.4.2 Verfahren nach Schmitt

Schmitt veröffentlichte 2014 einen vereinfachten Ansatz für Starkregenindizes im Wertebereich von 1 bis 7 (Mudersbach et al., 2017). Hierin werden Niederschlagsereignisse ohne Berücksichtigung ihrer Dauer einer Wiederkehrzeit von $T_n = 1$ a und $T_n = 100$ a zugeordnet und mit einem Index versehen. Diese Zuordnung erfolgt hier im Vergleich zu Grisa ohne Rechnung und ist rein intuitiv. So werden leichte Niederschläge (niedriger Starkregenindex) einer hohen Wiederkehrwahrscheinlichkeit zugeordnet ($T_n = 1$ a, $SI = 1$). Starke Niederschläge (hoher Starkregenindex) werden analog dazu einer niedrigen Wiederkehrzeit zugezählt ($T_n = 100$ a, $SI = 7$) (Mudersbach et al., 2017).

Da er ortsabhängige Unterschiede in den Niederschlagshöhen nicht berücksichtigt, wurde dieser Ansatz 2015 von Schmitt selbst überarbeitet (Mudersbach et al., 2017). Dazu hat Schmitt Erfahrungswerte aus der Wasserwirtschaft an 16 Orten in Deutschland miteinander verglichen und anhand der Differenzen in den Niederschlagshöhen Intervallbereiche für jeden SRI erstellt. Außerdem wurde die Skala von sieben auf zwölf erweitert, um alle Nieder-

schlagshöhen einordnen zu können (siehe Tabelle 2). Bei den kurzen Zeiträumen 15-minütiger Starkregenereignisse wurde aufgrund der schwierigen Differenzierbarkeit von sehr hohen Niederschlagsmengen in einem so kurzen Zeitraum auf die Angabe von Intervallbereichen verzichtet (Mudersbach et al., 2017). Durch die Erweiterung der Starkregenindizes auf zwölf und der Einführung von Intervallbereichen können nun Starkregenhöhen unabhängig vom Ort ihres Auftretens in einer Tabelle klassifiziert werden (Mudersbach et al., 2017).

Tabelle 2: Klassifizierungsmöglichkeiten für Starkregenindizes von SI 1 bis SI 12 nach Schmitt (Mudersbach et al., 2017)

Wiederkehrzeit T_n (a)	1-10	20	30	50	100	> 100				
Starkregenindex	1 - 3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Regendauer	Starkregenhöhen in mm									
15 min	10 - 20	20 - 25	25 - 30	30 - 35	> 35					
60 min	15 - 30	30 - 40	40 - 50	50 - 60	60 - 75	75-100	100-130	130-160	160-200	> 200
2 h	20 - 35	35 - 45	45 - 55	55 - 65	65 - 80					
4 h	20 - 45	45 - 55	55 - 60	60 - 75	75 - 85					
6 h	25 - 50	50 - 60	60 - 65	65 - 80	80 - 90	85-120	120-150	150-180	180-220	> 220

Da Schmitts Ansatz bis dato noch immer keine direkte Zuordnung einer Niederschlagshöhe auf einen Ort zuließ, folgte 2016 eine weitere Veröffentlichung (Schmitt et al., 2018). Mit der Einführung der Erhöhungsfaktoren (8 (1,2 - 1,4) bis 12 ($\geq 2,8$)) sollen sich von nun an im Bereich der Starkregenindizes von 8 bis 12 ortsabhängige Unterschiede in den Regenhöhen lokalisieren lassen (Schmitt et al., 2018).

2.4.3 Verfahren in der Emscher-Lippe-Region

Dieses 2016 veröffentlichte Verfahren von Pfister und Krüger beruht auf dem Ansatz von Grisa. Die Veränderungen in der Formel bewirken, dass nun auch Starkregenindizes für Wiederkehrzeiträume ab $T_n = 1$ a und eine Dauer von fünf Minuten bis sechs Tage mit in die Berechnungen einfließen können. Die Dauer wird in unterschiedlichen Stufen klassifiziert, die sogenannten Dauerstufen. Realisiert wird dies durch die Aufhebung der strikten Nutzung der normierten Tagessummen zur Extrapolation von langen Dauerstufen (ein Tag bis zehn Tage). Folglich sind Berechnungen auch für kurze Zeiträume von fünf Minuten bis zu einer Stunde möglich (siehe Gleichung 2).

$$h_N(T_n, D) = \sqrt{\frac{SI_{T_n, D} \cdot h_N(T_n, D = 1 \text{ d}) \cdot h_N(T_n = 100 \text{ a}, D)}{\left(1 + \frac{\log(T_n)}{\log(2)}\right)}}$$

Gleichung 2

mit:

SI	Starkregenindex (kaufmännische Rundung auf Ganzzahl)	[-]
T_n	Wiederkehrzeit mit $T_n = 100$ a	[a]
h_N	Niederschlagshöhe	[mm]
D	Dauerstufe	[min; h; d]

Mithilfe der Gleichung 2 können durch Verwendung der Starkregenindizes (Tabelle 3) Niederschlagshöhen aus Dauerstufe und vorgegebener Wiederkehrzeit von $T_n = 100$ a prognostiziert werden. Die Bewertung der verschiedenen Starkregen erfolgt durch die zwölf Starkregenindizes nach Schmitt, welche in vier Klassen sortiert werden, um die jeweilige Gefahrensituation einschätzen zu können.

Tabelle 3: Einteilung der Starkregenindizes nach Krüger und Pfister mit einer Bewertung der Starkregen mit Intensitätsbewertungen (Mudersbach et al., 2017)

Starkregenindex SI [-]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Bewertung des Starkregens	moderat			stark			heftig			extrem		

2.4.4 Verfahren nach Mudersbach

2016 publiziert Mudersbach eine Formel, die die bekannten Parameter wie Dauer und Wiederkehrzeit (bis $T_n = 100$ a) verarbeitet (siehe Gleichung 3). Zudem werden die Ergebnisse in elf Starkregenindizes eingeteilt (Mudersbach et al., 2017).

$$SI_{T_n,D} = \begin{cases} 1 & \text{für } T_n = 1 \\ \sim 1,5 \cdot \ln(T_n) + 0,4 \cdot \ln(D) & \text{für } 1 < T_n \leq 100 \\ 12 & \text{für } T_n > 100 \end{cases}$$

Gleichung 3

mit:

SI	Starkregenindex	[-]
T_n	Wiederkehrzeit	[a]
D	Dauerstufe	[min]
\sim	kaufmännische Rundung auf nächste Ganzzahl	

Nach Mudersbach werden alle Regenereignisse der Wiederkehrzeit $T_n = 1$ a pauschal dem Index 1 zugewiesen. Erst ab einer Wiederkehrwahrscheinlichkeit von $T_n \geq 2$ a ergibt die Gleichung 3 Indizes (Mudersbach et al., 2017). Dadurch erhält die Wiederkehrzeit eine stärkere Gewichtung als die Dauer. Das führt dazu, dass auch bei großen Wiederkehrzeiten und bei geringen Dauerstufen hohe Indizes erreicht werden können. Die von Mudersbach gewählte Gewichtung innerhalb der Formel ist jedoch subjektiv und beruht auf seinen Beobachtungen und Erfahrungswerten (Mudersbach et al., 2017). Tabelle 4 zeigt Indizes nach Gleichung 3.

Tabelle 4: Starkregenindex nach Mudersbach (Mudersbach et al., 2017)

Starkregenindex nach MUDERSBACH								
Dauer [min]	Wiederkehrzeit [a]							
	1	2	5	10	20	30	50	100
5	1	2	3	4	5	6	7	8
10	1	2	3	4	5	6	7	8
15	1	2	3	5	6	6	7	8
20	1	2	4	5	6	6	7	8
30	1	2	4	5	6	6	7	8
45	1	3	4	5	6	7	7	8
60	1	3	4	5	6	7	8	9
90	1	3	4	5	6	7	8	9
120	1	3	4	5	6	7	8	9
180	1	3	4	6	7	7	8	9
240	1	3	5	6	7	7	8	9
360	1	3	5	6	7	7	8	9
540	1	4	5	6	7	8	8	9
720	1	4	5	6	7	8	8	10
1080	1	4	5	6	7	8	9	10
1440	1	4	5	6	7	8	9	10
2880	1	4	6	7	8	8	9	10
4320	1	4	6	7	8	8	9	10
5760	1	5	6	7	8	9	9	10
7200	1	5	6	7	8	9	9	10
8640	1	5	6	7	8	9	9	11

3 Starkregenarten

Im Gegensatz zu Fluss- oder Küstenhochwasserereignissen, die meist mehrere Stunden oder sogar Tage vorher antizipiert werden können, treten Starkregen spontan auf und beschränken sich nicht auf einzelne Gebiete (Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, 2016). Daher kommt es immer wieder zu hohen Wasserständen, Überflutungen, Sturzfluten oder wild abfließendem Wasser, verursacht durch Starkregen. Die Folge sind Bodenerosionen, Hangrutschungen und Schäden an privatem Eigentum (Deutscher Wetterdienst, 2017b; Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, 2016).

Gebiete in Gegenden größerer Flüsse sind häufig schon länger mit Frühwarnsystemen ausgestattet, die auch im Falle eines starken Niederschlags gefährliche Pegelstände übermitteln (Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, 2019).

Doch viele Städte, Gemeinden sowie private Haushalte sind bislang, aufgrund geringer Erfahrungen mit Starkregen, nicht auf die Gefahr vorbereitet (Umweltbundesamt, 2019). Gerade in ländlichen Gegenden mit eher kleineren Flüssen und Einzugsgebieten entscheiden zum Beispiel die Speicherkapazität des Bodens und Rückhaltekapazitäten der betroffenen Gegend über die Auswirkungen eines Starkregens. Kleine Gewässer, ohne Pegelüberwachung, können innerhalb kürzester Zeit zu reißenden Strömen werden und können schwere Schäden verursachen (Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, 2019).

Aber auch in urbanen oder ländlichen Gegenden, ohne Bezug zu Gewässern, können Regenfälle Bemessungsgrenzen von Kanalisations- und Grundstücksentwässerungssystemen übersteigen und weiträumig Flächen überfluten. In diesem Fall sind besonders Senken und versiegelte Flächen als potenzielle Gefahrenquellen zu nennen. An tiefer gelegenen Gebäuden und Infrastrukturen sammelt sich das Oberflächenwasser und Versiegelungen verhindern ein

vorzeitiges Versickern. So entstehen erhebliche Schäden (Umweltbundesamt, 2019; LUBW, 2016, S. 12).

Es zeigt sich also, dass Starkregenereignisse überall zur Gefahr werden können. Der Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (GDV) schätzt die entstandene Schadenssumme für den Zeitraum von 2002 bis 2017 auf 6,7 Milliarden Euro (GDV, 2019). 2018 liegt die Summe der Elementarschäden bei 500 Millionen Euro, das ist doppelt so viel wie im Jahr zuvor (GDV, 2019). Mit Zunahme der globalen Temperaturen, verursacht durch den Klimawandel, nimmt auch die Verdunstung zu und führt dazu, dass mehr Wasserdampf für ein Niederschlagsereignis zur Verfügung steht. Das KOSTRA-DWD-2000 prognostiziert sogar für bestimmte Regionen Deutschlands, neben der Zunahme von Intensitäten, eine Zunahme der Häufigkeiten (Fabig, 2007).

Diese Entwicklung scheint auch immer mehr ins Bewusstsein der Öffentlichkeit zu rücken. Betrachtet man den Kurvenverlauf der Suchanfrage zum Stichwort „Starkregen“ der Suchmaschine Google, fällt auf, dass die Suchanfragen seit 2004 sukzessive gestiegen sind (siehe Abbildung 5).



Abbildung 5: Anstieg der Suchanfragen zum Thema "Starkregen" seit 2004. Die Y-Achse gibt den Wert dabei relativ zum Zeitpunkt der meisten Anfragen wieder (Google Trends, 2020)

Eine Ausnahme bildet dabei das Jahr 2016, in dem mit Abstand die meisten Treffer bezüglich des Suchbegriffs gelandet wurden (Umweltbundesamt, 2019). Vergleicht man diesen qualitativ hohen Wert mit der Anzahl an Ereignissen für 2016, so wird deutlich, dass sich 2016 verhältnismäßig viele Starkregenereignisse (mit insgesamt 800 Millionen Euro Elementarschäden (GDV, 2017)) über dem Süden Deutschlands ereignet haben. Darin könnte eine Erklärung für diesen hohen Ausschlag begründet liegen. Ebenso fällt auf, dass die meisten Suchanfragen in den Sommermonaten registriert wurden. Eine mögliche Ursache könnte sein, dass Starkregenereignisse, die zu konvektiven Niederschlägen zählen, meistens in der Mitte des Jahres auftreten und die Suchanfrage jeweils nach einem Ereignis erfolgte (Umweltbundesamt, 2019).

Um diesem Trend Folge zu leisten, bat die Umweltministerkonferenz die Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA), eine „Strategie für ein effektives Starkregenrisikomanagement“ zu erstellen (LAWA, 2018). Das entsprechende Konzept wurde 2018 veröffentlicht. Eine Arbeitsgruppe „Dokumentation von Starkregen“ der LAWA befasst sich derzeit mit der Konzipierung einer bundesweit einheitlichen Starkregenhinweiskarte, in der außergewöhnliche Niederschläge dargestellt werden können (LAWA, 2018).

Das Hauptziel von Starkregenkarten ist es, sich als Instrument der Risikokommunikation zwischen Bürgerinnen und Bürgern und zuständigen Behörden zu etablieren (Umweltbundesamt, 2019). Sie dienen dazu, einen Überblick über das Verhalten des Wassers bei Starkregenereignissen in den lokalen Gegebenheiten geben zu können (Umweltbundesamt, 2019). Diese Informationen sind hilfreich, wenn etwa größere infrastrukturelle Änderungen zum Schutz der Gemeinde anstehen oder Immobilieneigentümer bauliche Anpassungen zur Eigenvorsorge vornehmen wollen. In vielen Kommunen wurden in den vergangenen Jahren bereits Starkregengefahrenkarten veröffentlicht, meist im Zuge von Klimaanpassungskonzepten oder als Forschungsprojekte. Harmonisierte Vorgaben oder Richtlinien gibt es bislang keine. Das führt zu großen Unterschieden etwa bei der Darstellung oder dem Informationsgehalt (Umweltbundesamt, 2019). So werden häufig Begriffe wie Starkregenkarte, Starkregenhinweiskarte oder Starkregengefahren verwendet, ohne dass es eine einheitliche Begriffsdefinition gibt. Daher wird für den weiteren Verlauf dieser Arbeit die folgende Definition festgelegt:

- Starkregenhinweiskarten zeigen die aktuell fallende oder gefallene Menge an Regen eines Starkregenereignisses.
- Starkregengefahrenkarten bzw. -risikokarten zeigen die für einen definierten Regen überfluteten Bereiche bzw. bewerten die Gefährdung für den Menschen in diesen Bereichen.
- Starkregenkarten (oder auch Starkregenereigniskarten) gilt als Überbegriff und umfasst sowohl Starkregenhinweiskarten als auch Starkregengefahrenkarten.

3.1 Aktuell veröffentlichte Starkregenkarten

Nach Angaben des Umweltbundesamtes (2019) wurden bis März 2018 sieben Starkregenkarten bundesweit veröffentlicht. Im Juni 2020 sind es nach Internetrecherche 39 (Anhang 1). Dabei ist zu erwähnen, dass sowohl die Recherche des Umweltbundesamtes (2019), als auch die eigene, keinen Anspruch auf Vollständigkeit leisten kann, da sich Kommunen und Gemeinden mitunter verschiedene Plattformen teilen, die Karten kurzfristig nicht mehr verfügbar oder im Internet unterschiedlich präsent sind.

In den folgenden Unterkapiteln werden einige Kartentypen exemplarisch vorgestellt. Es wird auf ihre wichtigsten Gemeinsamkeiten und Unterschiede eingegangen, etwa hinsichtlich der Wahl der Starkregenszenarien und ihren Darstellungen, ihren jeweiligen Bereitstellungssystemen, sowie angewandten Modellierungsansätzen.

Im Anhang 1 findet sich eine Liste zu allen 39 Karten inklusive einer vollständigen Übersicht zu Funktionen und Datengrundlage.

3.1.1 Inhaltlicher Vergleich aktueller Starkregenereigniskarten

Im folgenden Kapitel sollen die Starkregengefahrenkarten der Städte Köln, Gelsenkirchen, Oldenburg, Erkrath und Ochsenhausen exemplarisch erläutert und miteinander verglichen werden. Bei den gewählten Karten handelt es sich ausschließlich um Starkregengefahrenkarten, da dieser Kartentyp den größten Informationsgewinn verspricht und im Folgenden eine Weiterentwicklung dieses Typs geprüft werden soll. Doch auch innerhalb dieses Kartentyps unterscheiden sich die Karten stark. Einige simulieren Einstauhöhen (oder auch Einstautiefen), die den Wasserstand an neuralgischen Geländepunkten, wie Senken, Hanglagen oder Mulden angeben. Andere Karten interpretieren darüberhinaus sogenannte Gefahrenzonen. Diese Gefahrenzonen sind meist Teil der Starkregengefahrenkarten und werden aus den Einstauhöhen abgeleitet. Zur Berechnung dieser Einstauhöhen bedarf es sogenannter Computermodellierungen. Diese werden in der Regel mit Hilfe von 2D-Oberflächenmodellierung oder hydrologisch-hydraulischer Modellierung erstellt. Bei der 2D-Oberflächenmodellierung wird lediglich das Abflussverhalten des Wassers oberhalb des Geländes mittels Senken- und Fließweganalysen betrachtet. Ein hydrologisch-hydraulisches Modell berücksichtigt hingegen auch die Entwässerungsleistung der Kanalisation. Auf diese Art und Weise sollen neuralgischen Punkte der Infrastruktur markiert und je nach Gefährdung in Klassen eingeteilt werden. Jede Klasse erhält dabei unterschiedliche Farbnuancen. Im Kapitel „3.3.1 Hydrologisch-hydraulische Modellierungsansätze“ wird diese Thematik noch genauer erläutert.

In der Stadt Köln werden zum Beispiel vier Gefahrenstufen für jeweils drei Starkregenszenarien in blauen Farbtönen dargestellt. Die drei Szenarien sind „Mittel“, „Selten“ und „Extrem“. Hinter dieser Kategorisierung sind Jährlichkeiten [a] und Niederschlagsmengen $[(\text{mm}/\text{m}^2)/\text{h}]$ definiert (siehe Tabelle 5). Durch Geländemodellierungen zeigt die Karte auf diese Weise an einigen Stellen Niederschlagshöhen, die als Gefahrenzonen interpretiert werden. Wie bei den meisten veröffentlichten Karten wurde in Köln ein zweidimensionaler Modellierungsansatz gewählt. Hierbei werden Geländehöhenpunkte und infrastrukturelle Besonderheiten erfasst und mit den Niederschlagsdaten verschnitten. Senken, Hänge oder tiefergelegene Ebenen können so als potenzielle Einstaugebiete angegeben werden.

Tabelle 5: Hintergrundinformationen zur Starkregengefahrenkarte der Stadt Köln (Stadtentwässerungsbetriebe Köln, 2017)

Köln			
Wählbare Szenarien	Mittel	Selten	extrem
Jährlichkeit [a]	30	50	100
- in Niederschlag $[(\text{mm}/\text{m}^2)/\text{h}]$	39,50	43,00	48,00
Niederschlagshöhen [cm]	< 10,00 10,00 - 30,00 > 30,00 > 50,00		
Gefahrenstufen	Gering Mäßig Hoch Sehr hoch		
Farbe	Blau		
Modellierung	2D-Oberflächenabfluss		
Format	Interaktiv		

Ähnlich wie die Stadt Köln bietet auch die Stadt Gelsenkirchen ein auf Jährlichkeiten, Niederschlagshöhen und dem Ansatz einer interaktiven 2D-Oberflächenabfluss-Karte basiertes Modell. Zur Auswahl stehen aber nur ein Starkregenereignis und die daraus resultierenden Niederschlagshöhen. Diese sind auf eine andere Art und Weise klassifiziert und farblich unterteilt. Dies ist in Tabelle 6 genauer erläutert.

Tabelle 6: Hintergrundinformationen zur Starkregengefahrenkarte der Stadt Gelsenkirchen (Stadt Gelsenkirchen, 2020)

Gelsenkirchen	
Wählbare Szenarien	-
Jährlichkeit [a]	100
- in Niederschlag [(mm/m ²)/h] (nach KOSTRA DWD 2010)	52,20
Niederschlagshöhen [m]	< 0,05 > 0,05 > 0,10 > 0,25 > 0,50 > 1,00 > 2,00
Gefahrenstufen	-
Farbe	Gelb - Rot - Blau
Modellierung	2D-Oberflächenabfluss
Format	Interaktiv

In Oldenburg (Oldb.) werden wiederum drei Szenarien zur Auswahl angeboten. Auf die Angabe der entsprechenden Jährlichkeit, sowie Niederschlagshöhen wird hier verzichtet. Lediglich die Einstauhöhen werden quantitative Angabe farblich markiert. Die Interpretation der Gefahrenlage bzw. der Gefahrenzonen obliegt also dem Nutzenden (siehe Tabelle 7). Mögliche Gründe für diese Herangehensweise werden im Abschnitt „3.1.2 Systeme der Bereitstellung“ diskutiert.

Tabelle 7: Hintergrundinformationen zur Starkregengefahrenkarte der Stadt Oldenburg (Oldb.) (Stadt Oldenburg, 2019)

Oldenburg			
Wählbare Szenarien	Intensiv	Außergewöhnlich	Extrem
Jährlichkeit [a]	-		
- in Niederschlag [(mm/m ²)/h] (nach KOSTRA - DWD 2000)	29,80	36,50	44,00
Niederschlagshöhen [cm]	-		
Gefahrenstufen	-		
Farbe	Blau		
Modellierung	2D-Oberflächenabfluss		
Format	Interaktiv		

Die Stadt Erkrath verzichtet auf die Angabe von Jährlichkeiten und stellt Starkregenindizes zur Auswahl. Für die Regenintensitäten wurden die entsprechenden ortsbezogenen KOSTRA-DWD-2010 Stationsdaten herangezogen. Die Niederschlagshöhen sind in vier Gruppen klassifiziert und farblich blau markiert. Als Besonderheit ist der hydrologisch-hydraulische Modellierungsansatz zu nennen (siehe Tabelle 8). Insgesamt wurde dieser detailliertere Ansatz von den fünf Kommunen und Städten Wuppertal, Remscheid, Leichlingen, Erkrath und Dresden gewählt.

Tabelle 8: Hintergrundinformationen zur Starkregengefahrenkarte der Stadt Erkrath (Stadt Erkrath, o.J.)

Erkrath			
Wählbare Szenarien	SRI 7	SRI 9	SRI 12
Jährlichkeit [a]	-		
- in Niederschlag [(mm/m ²)/h] <i>(nach KOSTRA - DWD 2010)</i>	-		
Niederschlagshöhen [cm]	< 10,00 10,00 - 30,00 > 30,00 > 50,00		
Gefahrenstufen	-		
Farbe	Blau		
Modellierung	Hydrologisch-hydraulisch		
Format	Interaktiv		

Die Stadt Ochsenhausen bietet Starkregengefahrenkarten im PDF-Format zum Download an. Es werden die Ereignisse „Selten“, „Außergewöhnlich“ und „Extrem“ angenommen und sich einstellende Wassertiefen in Zentimetern und in Blautönen markiert. Quantitative Aussagen, die beschreiben, durch welche Jährlichkeiten beziehungsweise welche Niederschlagsvolumen pro Zeiteinheit sich die Wassertiefen einstellen, werden nicht gemacht. Auf eine Erläuterung bezüglich der Modellierung wird auch verzichtet. In Tabelle 9 sind diese Angaben genauer aufgeführt:

Tabelle 9: Hintergrundinformationen zur Starkregengefahrenkarte der Stadt Ochsenhausen (Stadt Ochsenhausen, 2018)

Ochsenhausen			
Wählbare Szenarien	selten	außergewöhnlich	extrem
Jährlichkeit [a]	-		
- in Niederschlag [(mm/m ²)/t]	-		
Niederschlagshöhen [cm]	> 10,00 - 15,00 > 10,00 - 50,00 > 50,00 - 100,00 > 100,00		
Gefahrenstufen	-		
Farbe	blau		
Modellierung	Keine Angabe		
Format	PDF		

3.1.2 Systeme der Bereitstellung

Als Bereitstellungssystem wählen 24 der 39 Anbieter für ihre Starkregenkarten das Geografische Informationssystem (GIS). Dieses Geoportal ist bei einigen Kommunen und Städten bereits zur Darstellung von Liegenschaftskarten oder zur Bekanntmachung von Wasserschutz- und Tierschutzgebieten im Einsatz. Abbildung 6 zeigt exemplarisch die Darstellung einer Starkregengefahrenkarte des Landkreises Lörrach.

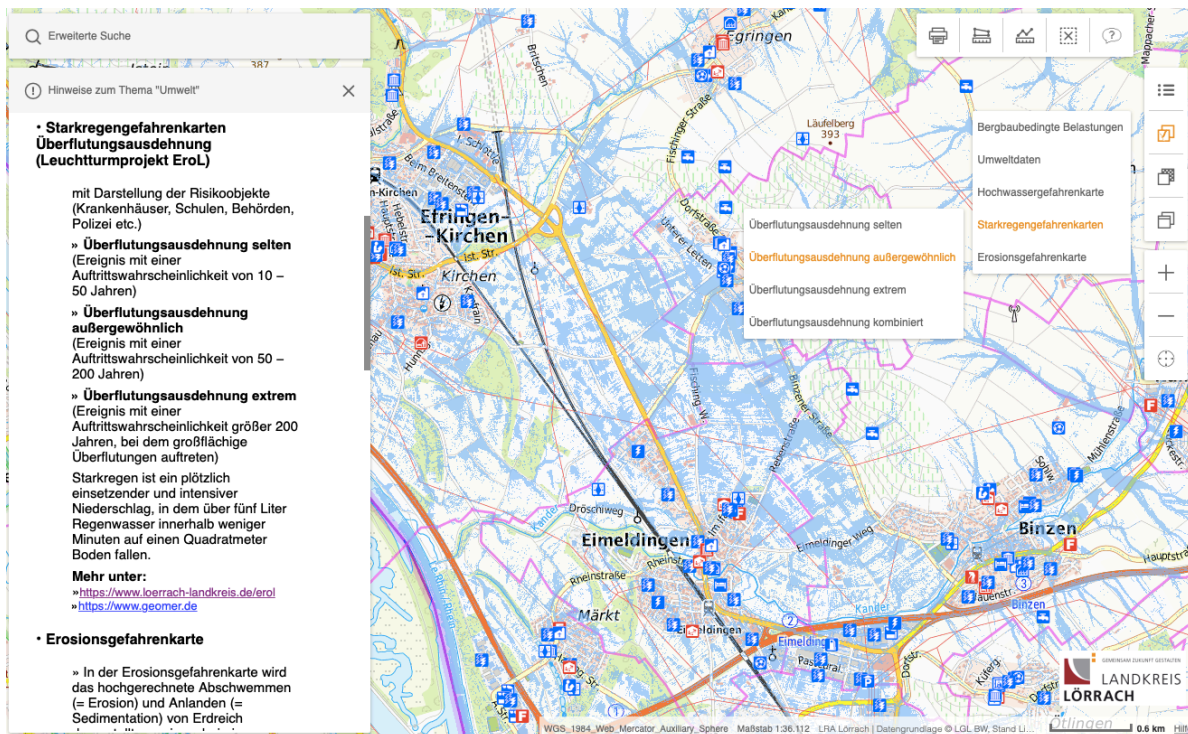


Abbildung 6: GIS-basierte Darstellungsmethoden einer Starkregengefahrenkarte für den Landkreis Lörrach (Landkreis Lörrach, 2020)

Die Nutzerinnen und Nutzer eines solchen Geoportals können in die Karte hinein- und herauszoomen, den Standort durch Klicken in der Karte wechseln oder mittels eines Adressfeldes beliebige Orte suchen.

Die Nutzung von GIS bietet die Möglichkeit des modularen Aufbaus (LAWA, 2019). Das bedeutet, der Informationsgehalt der webbasierten Kartenanwendung kann auf den jeweiligen Bedarf zugeschnitten und jederzeit erweitert werden (LAWA, 2019). Mit sogenannten „Layers“ können zum Beispiel topografische Gegebenheiten, Flurstücke, Liegenschaften oder Kanalisationsnetze einer Region visualisiert und nach Bedarf eingeblendet werden. So können in der in Abbildung 6 dargestellten Karte neben der Starkregengefahrenkarte Informationen über bergbaubedingte Belastungen, Umweltdaten, Hochwassergefahrenkarten und Erosionsgefahrenkarten abgerufen werden (Landkreis Lörrach, 2020).

Doch nicht alle der recherchierten Karten bieten die Möglichkeit, variabel auf unterschiedliche Informationen zuzugreifen. In zwölf Fällen wird nur eine festgelegte Vorauswahl zur Darstellung der Starkregenkarten geboten. Die Kommunen und Städte verzichten auf webbasierte Geoportale und bieten ihre Informationen für ihre Region als PDF-Dokument zum Download an. Inhaltlich unterscheiden sie sich nicht, da sie intern ebenfalls über Geoportale

erstellt werden. Jedoch beeinträchtigt die Wahl des PDF-Formats den Informationsgehalt einer Karte, da weder auf bestimmte Regionen detaillierter herangezoomt werden kann, noch verschiedene Layer miteinander verschnitten werden können.

Die Städte Trier, Emsdetten und Ludwigshafen bieten Starkregenkarten nur auf Anfrage. Nach Angaben der Stadt Trier, können die Karten beim städtischen Tiefbauamt eingesehen werden, um „fachgerechte Interpretationen“ gewährleisten zu können (Trier, 2020). Die gleichen Gründe werden auch in Ludwigshafen genannt (Ludwigshafen, 2020). In Emsdetten können Informationen per E-Mail eingeholt werden, da eine Veröffentlichung aus „Datenschutzgründen“ nicht möglich sei (Emsdetten, 2019).

Dabei dürfte auch in den Fällen Trier und Ludwigshafen die Problematik im Datenschutz begründet liegen. Für viele Kommunen, Städte und Länder spielt der Datenschutz bei der Veröffentlichung von Starkregengefahrenkarten eine wichtige Rolle (Correctiv, 2020). Denn in einigen lassen die detaillierten Karten Rückschlüsse auf persönliche Informationen zu. So fürchten Entscheidungsträger und Anwohner zum Beispiel einen Wertverlust der Grundstücke und Immobilien, wenn eine erhöhte Gefährdung dargestellt ist, oder dass personenbezogene Daten veröffentlicht werden. Angesichts der Zunahme von Starkregen verheerender Ausmaße sind immer mehr Rechtsanwälte und Kommunen der Meinung, die Sicherheit und Vorsorge für Schutzgüter nehme eine wichtigere Rolle ein als Datenschutz und Wertverfall (Correctiv, 2020).

3.2 Starkregenhinweiskarte nach LAWA

Starkregenereignisse werden intensiver und lassen sich nicht verhindern. Daher ist ein einheitliches und allgemein verständliches Starkregenrisikomanagement wichtig, etwa um Vorsorgemaßnahmen planen und umzusetzen zu können (Umweltbundesamt, 2019). Unter Vorsorgemaßnahmen versteht man zum Einen bauliche Maßnahmen, wie zum Beispiel die Erstellung von Regenrückhaltebecken, die Entsiegelung von Flächen oder infrastrukturelle Anpassung zur Beeinflussung des Fließverhaltens des Wassers, sowohl unter- als auch oberirdisch. Zum Anderen sollen die Vorsorgemaßnahmen das Risikobewusstsein für Starkregen steigern, und beratend bei der Einsatzplanung von Feuerwehren und Technischen Hilfswerken eingesetzt werden (Umweltbundesamt, 2019). In einem Arbeitspapier der LAWA aus dem Jahr 2018 wird empfohlen, folgende Punkte zur Registrierung in einer bundesweit einheitlichen Starkregenhinweiskarte zu darzustellen (LAWA, 2018):

- Ort
- Dauer
- Intensität
- Schadensdokumentation
- ergriffene Maßnahmen

Mit der Einigung auf die Nutzung der RADOLAN Radardaten des DWD in der Sitzung der LAWA im Jahr 2019, die Ort, Dauer und Intensität der Niederschlagsereignisse bereits erfassen, können die Daten mit einer Internetplattform bewertet und kartografisch dargestellt werden (LAWA, 2019).

Als geeignete Plattform wird von der LAWA das Geografische Informationssystem (GIS) genannt. Das Geoportal bietet die Möglichkeit die Niederschlagsdaten mit den kommunalen hydrologischen Daten zu kombinieren und somit den Informationsgehalt der Karten zu erweitern (LAWA, 2019). Wie in Kapitel „3.1 Aktuell veröffentlichte Starkregenkarten“ bereits erwähnt, ist in den meisten Fällen die Infrastruktur dafür bereits geschaffen. In den übrigen Fällen dürfte eine Bereitstellung eines Geoportals umsetzbar sein, da behördliche Internetanwendungen meist über Server funktionieren, die von Kommunal-, Landes- oder Betriebsrechenzentren betrieben werden (LAWA, 2019).

Zur Berechnung der Intensitäten wird auf den Starkregenindex basierend auf Jährlichkeiten nach Schmitt zurückgegriffen und auf die Angabe von Millimetern pro Quadratmeter [mm/m^2] verzichtet (LAWA, 2019). Damit soll die Nutzung der Karte intuitiver sein. Diese Festlegung folgt der Empfehlung der DWA aus dem DWA- Merkblatt M 119 (LAWA, 2019).

3.3 Erweiterungspotenzial

3.3.1 Hydrologisch-hydraulische Modellierungsansätze

Der sogenannte Überstaubeitrag aus der Kanalisation ist bei der Modellierung von Starkregengefahrenkarten und der Ausweisung von Gefahrenzonen ein wichtiger Parameter (Scheid, 2018). Denn man versteht darunter die Menge an Wasser, die bei starken Niederschlägen das Fassungsvermögen der Kanalisation übersteigt und entsprechend zurückgestaut wird. Dieser Rückstau führt zu Schäden durch wieder austretendes Wasser, welches sich an der Oberfläche, dem Gefälle folgend, in Senken oder an Gebäuden sammelt. Gerade hinsichtlich der Berechnung von Einstauhöhen und Gefahrenzonen ist die Berücksichtigung des Überstaubeitrags also wichtig. (Scheid, 2018).

Nach Schmitt (2017) kann ab dem Starkregenindex 3, also ab Wiederkehrzeiten von $T_n = 10$ a, eine geregelte Entwässerung durch die örtliche Kanalisation nicht mehr vollständig gewährleistet werden. Eine sachgerechte Darstellung des Verhältnisses aus den Teilgrößen Niederschlag und Abfluss erfordert die Betrachtung der beiden Systemgrößen Niederschlagsmenge und Überstaubeitrag (Scheid, 2018). Dies zeigt sich besonders, wenn die Kapazitäten der Kanalisation erreicht oder überschritten sind, und folglich das Wasser an die Oberfläche tritt. In diesem Moment nimmt die Interaktion der beiden Teilsysteme so zu, dass mit zunehmender Niederschlagsbelastung die Teilgröße des Abflusses in die Kanalisation an Bedeutung verliert und das maßgebliche Verhältnis auf die Teilgröße des Oberflächenabflusses übergeht (Scheid, 2018). Abbildung 7 zeigt die Unterschiede zwischen vier verschiedenen Modellierungsansätzen am Beispiel der Gemeinde Grafschaft in Rheinland-Pfalz. Dabei reicht der Ansatz von einer vereinfachten Oberflächendarstellung bis zu einer detaillierten Berücksichtigung des Abflussverhaltens durch die Kanalisation.

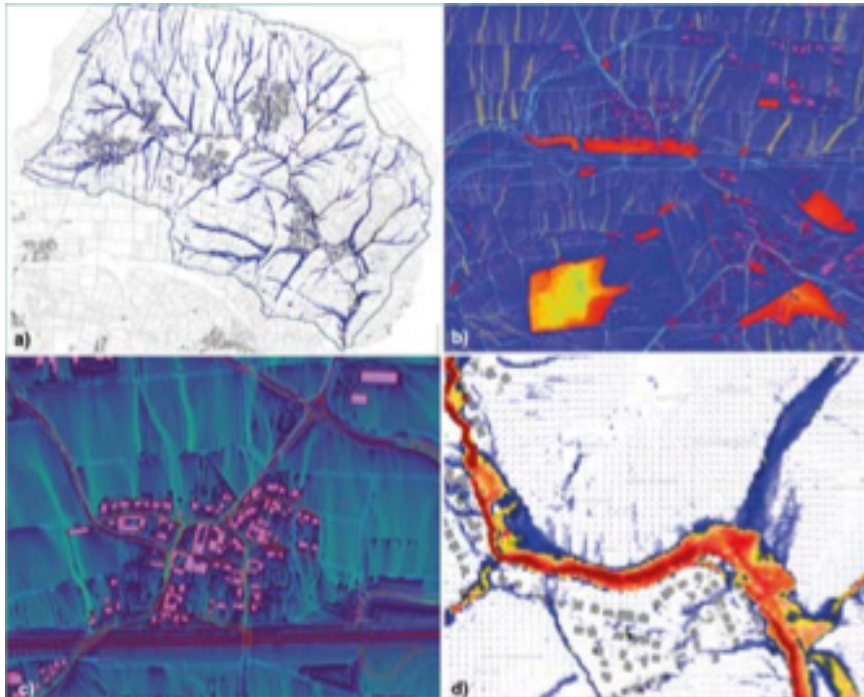


Abbildung 7: Modellierungsansätze zur Darstellung von Starkregenereignissen

a) Vereinfachte Oberflächendarstellung ohne Berücksichtigung der Parameter wie etwa versiegelte Oberflächen, Gebäude, Brücken, Rückhaltebecken oder Dämme

b) Berücksichtigung von Senken und Mulden, in denen sich das Wasser stauen kann (hier gelb bis rot eingefärbt)

c) Darstellung aller abflussrelevanter Parameter inklusive Kanalnetz. An der Oberfläche abfließendes Wasser ist grün und im Untergrund abfließendes Wasser ist rot dargestellt

d) Überflutungsbereiche ausgehend von einem Bachlauf (Gerz et al., 2019).

Eine Möglichkeit die Problematik des Überstaus aus der Kanalisation in der Betrachtung zu berücksichtigen, ist beispielsweise ein Gefahrenzuschlag (Scheid, 2018). Für die Erstellung von Gefahrenzuschlägen können die Arbeitsblätter DWA-A-118 zur Hilfe genommen werden. Diese liefern Anhaltspunkte zum Überlastungsverhalten von Kanalisationen bei Starkregenereignissen bis zu einer Wiederkehrzeit von $T = 20$ a (Scheid, 2018).

Außerdem muss bewertet und katalogisiert werden, welche Kanalnetzbereiche und Schächte zu einer überstauinduzierten Gefährdungsverschärfung beitragen. Dies kann zum Beispiel durch die Bestimmung einer Überstauhäufigkeit geschehen (Schmitt et al., 2014). Die Überstauhäufigkeit hängt von den örtlichen Gegebenheiten des Kanalnetzes und der Gesamtüberlastungssituation ab (Schmitt; Scheid 2014). Diese Überstauinformationen und der daraus resultierende Gefahrenzuschlag kann jedoch auch vereinfacht durch eine Pauschale berücksichtigt werden (Scheid, 2018). Hierbei beruft man sich auf Erfahrungen etwa aus der Abwasserwirtschaft zu regelmäßigen Überlastungen und Wasseraustritten (Scheid, 2018).

In der Regel ist der Aufbau einer hydrologisch-hydraulischen Modellierung jedoch sehr komplex und benötigt hohe Rechnerleistungen (Stadtentwässerungsbetriebe Köln, 2017). Der Grund hierfür ist, dass stets zwei Modelle für beide Teilgrößen aufgebaut werden müssen. Erschwerend kommt hinzu, dass der Arbeits-, Kosten- und Rechenaufwand mit zunehmender Größe des Bearbeitungsgebiets und mit höherer Auflösung steigt (HSB, 2017).

3.3.2 Schadens- und Maßnahmendokumentation

Für die Dokumentation eines Schadens sind mit dem Ort, der Dauer und der Intensität viele wichtige Angaben für die Einordnung eines Regenfalls gemacht. Doch lassen diese Informationen noch keine Rückschlüsse auf die Ausmaße der Schäden zu. Dabei wäre gerade die Analyse der Auswirkungen eines Starkregenereignisses für ein effektives Risikomanagement von besonderer Bedeutung (Hofmann et al., 2019). Die raumzeitliche Kombination von Niederschlagsradar­daten, Schadensdokumentationen, zum Beispiel mittels georeferenzierter Fotoaufnahmen, und statistischen Einsatzdaten bilden die Grundlage für eine weiterführende Gefährdungsanalyse (Hofmann et al., 2019). Daher soll die von der LAWA angestrebte bundesweite Starkregenkarte die Möglichkeit bieten, Schadensdokumentationen sammeln zu können. In dem Arbeitspapier der LAWA (2019) werden drei Varianten der Schadenserfassung vorgeschlagen:

1. Bürgerinnen und Bürger haben die Möglichkeit über eine Erfassungsmaske auf der bereitgestellten Internetplattform eigenes Foto- und Videomaterial hochzuladen.
2. Die Erfassung von Schäden erfolgt nach einem regionalen Starkregenereignis durch Verantwortliche der Kommune. Wie unter Punkt 1 werden auch hier die Schäden mit Foto- oder Videomaterial dokumentiert.
3. Eine übergeordnete qualifizierte Stelle kümmert sich überregional um die lückenlose Dokumentation und Interpretation von Schäden verursacht durch Starkregen.

In Zusammenarbeit der Kommunen Glems, Blaubeuren, Wadern, sowie der Geomer GmbH entstand die Internetseite Starkregengefahr.de (Geomer GmbH, 2020). Hier haben die Nutzerinnen und Nutzer die Möglichkeit Foto- und Videomaterial hochzuladen, um Schäden in ihrer Region zu dokumentieren und/oder Anregungen für Anpassungsmaßnahmen zum Schutz vor Starkregen mitzuteilen (siehe Abbildung 8).

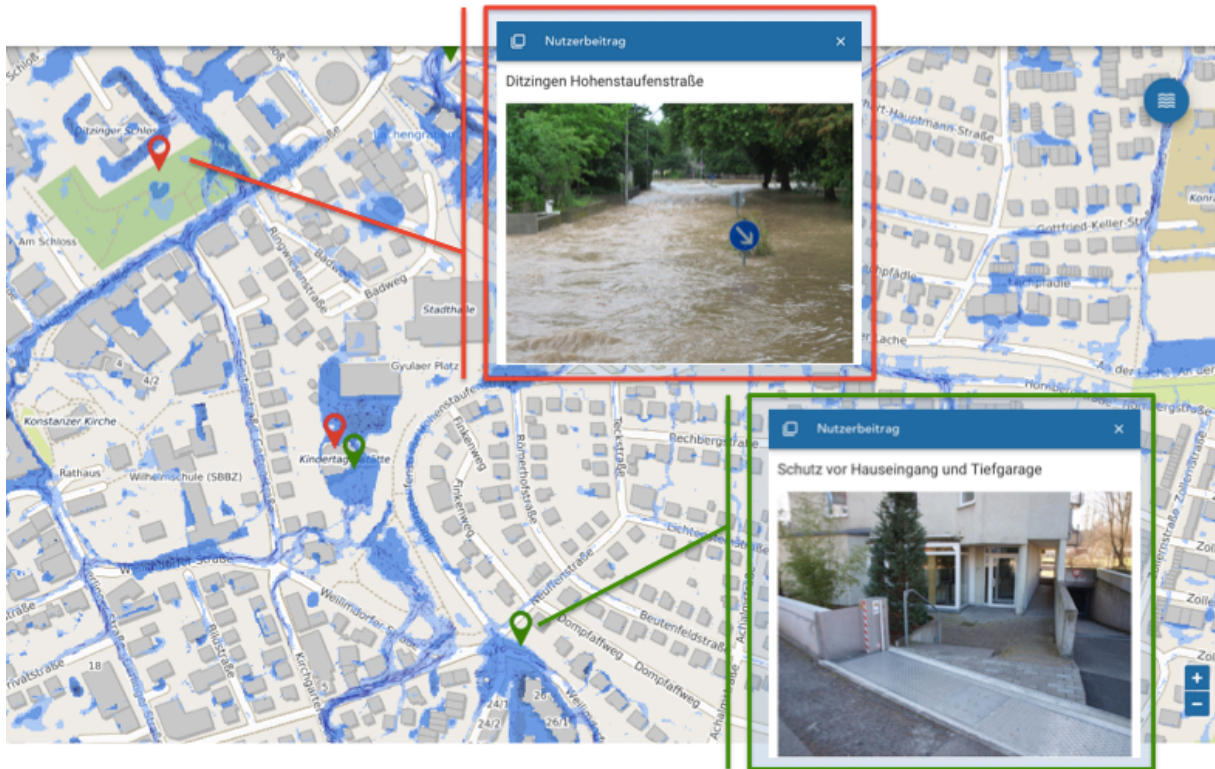


Abbildung 8: Schadens- und Maßnahmendokumentation in der Starkregenkarte des Einzugsgebiets Glems auf Starkregen.de (Geomer GmbH, 2020)

Die Nutzenden können ihre Erfahrungen auf zwei Arten teilen: Durchgeführte und schützende Maßnahmen werden in der Starkregenkarte georeferenziert in grüner Farbe markiert und mit einem entsprechenden Bild der Maßnahme visualisiert. Analog dazu werden Gefahrenbereiche, an denen es bei vergangenen Starkregenereignissen zu Überflutungen gekommen ist, mit roter Farbe bildlich festgehalten (Geomer GmbH, 2020).

Die Internetseite lädt Anwohner, Unternehmen und Kommunen der jeweiligen Regionen ein, Fotomaterial über eine Upload-Funktion zu teilen (Geomer GmbH, 2020). Hierbei muss der Ort, beispielsweise Glems, gewählt, und die genaue Lokalität in der Karte markiert werden. Anschließend können Fotos, Titel und eine Beschreibung des Ereignisses hinzugefügt und schließlich eine der beiden oben genannten Kategorien ausgewählt werden (Geomer GmbH, 2020).

Eine Möglichkeit die Aufnahmen automatisierter in einen passenden raumzeitlichen Kontext zu setzen, könnte die Verarbeitung der GPS-Informationen sein. Die eingesandten Aufnahmen werden dann verarbeitet und georeferenziert in dem GIS-basierten System kartiert (Hofmann et al., 2019). Zeitgleich werden mittels Radardaten akkumulierte Niederschlagsmengen bis zum Zeitpunkt der Fotoaufnahme für das relevante Gebiet errechnet und anschließend in einen raumzeitlichen Zusammenhang gebracht (Hofmann et al., 2019).

Schwierigkeiten bei der Verarbeitung der Fotos birgt jedoch häufig der Datenschutz (Geomer GmbH, 2020). Aus diesem Grund muss vor Verwendung eines Bildes sichergestellt werden, dass keine Rechte Dritter verletzt werden. Im Falle der Internetseite Starkregengefahr.de muss sich der Nutzer oder die Nutzerin zunächst auf der Plattform registrieren. Mit der An-

meldung wird der Bedingung zugestimmt, dass das hochgeladene Material zunächst durch die Seitenbetreiber geprüft und anschließend veröffentlicht wird (Geomer GmbH, 2020).

Neben der Einhaltung des Datenschutzes ist bei der Verwendung von Bildmaterial darauf zu achten, dass ohne raumzeitlichen Bezug und ohne Kenntnis des Niederschlagsverlaufs eine Validierung von infrastrukturellen Schwachpunkten nur bedingt möglich ist. Das bedeutet, es muss sowohl für das Niederschlagsereignis der Region eine genaue zeitliche Dokumentation des Verlaufs vorliegen, als auch eine zeitliche Georeferenz bei den Fotos bestehen (Hofmann et al., 2019).

In der Karte soll ebenfalls vermerkt werden können, dass Maßnahmen zur Schadensminimierung aufgrund vorangegangener Starkregen ergriffen wurden. Die Veröffentlichung dieser Maßnahmen, sollte laut LAWA zwecks Qualitätssicherung ausschließlich durch eine zertifizierte Stelle erfolgen. Die Dokumentation von schadensminimierenden Maßnahmen kann auch zu Beginn als „Best-Practice“-Variante erfolgen, ehe langfristig eine flächendeckend visuelle Dokumentation angestrebt wird. (LAWA, 2019).

Das Bremer Forschungsprojekt KLAS hat zum Thema Maßnahmenplanung und -umsetzung drei Themenbereiche definiert, die ein erfolgreiches Risikomanagement kurz- bis langfristig ermöglichen soll:

Tabelle 10: Drei Themenbereiche des Bremer Forschungsprojekts KLAS für ein erfolgreiches Risikomanagement (HSB, 2017)

	Überflutungsvorsorge und Risikomanagement	Wasser- und klimasensible Stadtentwicklung	Stärkung der Eigenvorsorge von Grundstückseigentümern
Zeitraum	Kurz- bis mittelfristig	Langfristig	Begleitend
Umsetzung	Vorsorgemaßnahmen für von Überflutung potenziell betroffene öffentliche Bereiche und kritische Infrastrukturen	Berücksichtigung der Belange der Starkregenvorsorge bei öffentlichen Planungs- und Bauvorhaben	Information, Aufklärung und Sensibilisierung von Bürgern bzw. Grundstückseigentümlern für Rückstau- und Objektschutzmaßnahmen sowie klimaangepasste Grundstücke

Für eine erfolgreiche Überflutungsvorsorge und ein erfolgreiches Risikomanagement sind möglichst detaillierte Kartenmodellierungen notwendig (HSB, 2017). Bei dem Bremer Forschungsprojekt wurden Kanalnetz- und Oberflächenmodelle verwendet, die es kurzfristig ermöglichen, durch Kartenmodellierungen erkannte Gefahrenbereiche baulich zu korrigieren. So wurden zum Beispiel im Zuge einer anstehenden Kanalsanierung Senken und Gefälle an der Oberfläche ausgebessert (HSB, 2017).

Kurz- bis mittelfristig können also auf Basis von Starkregenkarten schützende Anpassungsmaßnahmen getroffen und auch kartiert werden (HSB, 2017). Doch sind private Maßnahmen, wie in Abbildung 8 zu sehende Einrichtung einer Wasserbarriere, eher eine Ausnahme. Eher werden Maßnahmen durch die Gemeinden im öffentlichen Raum umgesetzt, wodurch eine Gefährdung des privaten Grundstückes nicht gänzlich ausgeschlossen werden kann.

Daher ist eine umfangreiche und intensive Aufklärung der Bürgerinnen und Bürger begleitend besonders wichtig. Die Sensibilisierung für das Thema Starkregen erfolgt im Bremer Forschungsprojekt KLAS in drei Stufen:

- Starkregengefahrenkarte als erstes Instrument zur Sensibilisierung
- Detailliertere Zusammenstellung von Informationen für interessierte Grundstücksbesitzer in Form eines Auskunftformulars
- Persönliche Beratung vor Ort zum Thema Überflutungsvorsorge (HSB, 2017).

Als weiteres Beispiel, um eine Auskunft über die Gefährdung des eigenen Grundstücks zu bekommen, ist das Online-Tool Hochwasser-Pass zu nennen. Es liefert Standortanalysen und Gefahrenbewertungen bei bestehenden oder geplanten Bauten und ermöglicht die Umsetzung individueller Maßnahmen (Umweltbundesamt, 2019).

Langfristig müssen Vorsorgemaßnahmen gegen Starkregen und Überflutungen bei städteplanerischen Entscheidungen berücksichtigt werden (HSB, 2017). Dies gilt sowohl für private Bauwillige als auch bei öffentlichen Bauvorhaben der Gemeinden und Länder (HSB, 2017).

3.3.3 Feuerwehreinsätze

Bei der in den vorangegangenen Abschnitten erläuterten Ermittlung von Überflutungsrisiken ist mit Ungenauigkeiten zu rechnen. Diese Ungenauigkeiten entstehen zum Beispiel aus methodischen Freiheitsgraden oder Abweichungen in den Datengrundlagen. Eine Validierung der identifizierten Gefahren- und Risikobereiche aus zum Beispiel Senken- und Fließweganalysen, können durch die Auswertung von Feuerwehreinsätzen erfolgen (RISA, 2015). Darauf soll in diesem Abschnitt genauer eingegangen werden.

Durch den Vergleich der Einsatzdaten der Feuerwehren mit den Niederschlagsdaten kann untersucht werden, ob eine Korrelation zwischen den beiden Datensätzen besteht und beispielsweise häufig die gleichen Keller ausgepumpt werden müssen. Damit können direkte Rückschlüsse über die Exposition eines Gebiets durch Starkregenereignisse gezogen werden (Kutschker, 2019). Eine Methodik zur Auswertung ist die Einzelüberprüfung von Einsätzen (Scheid, 2018). Hierbei wird die Örtlichkeit eines Einsatzes mit den simulierten Gefahrenzonen aus den Starkregengefahrenkarten überlagert und verglichen. Fallen Gefahrenzonen und Feuerwehreinsätze zusammen, so werden daraus Gefahrenhotspots unterschiedlicher Signifikanz abgeleitet. Eine Auswertung von Scheid aus dem Jahr 2018 betrachtete 75 Einsätze aus fünf Jahren (2009 bis 2013) im Raum Saarbrücken. Das Ergebnis zeigte, dass in etwa 80 Prozent der Fälle eine kausale Verbindung zu einer infrastrukturellen Gefährdungszone vorlag (Scheid, 2018).

Die Überprüfung jedes Einzelfalls ist in der Praxis jedoch meist zu aufwändig und zeitintensiv (Scheid, 2018). Vielmehr bietet sich in diesen Fällen eine statistische Lageauswertung der registrierten Feuerwehreinsätze für das entsprechende Untersuchungsgebiet auf Basis GIS-gestützter Abstandsberechnungen an. Hierbei wird die räumliche Nähe zwischen Feuerwehreinsätzen und generierten Gefahrenzonen analysiert und in einer Karte visualisiert. Da es sich bei den Lageinformationen der Feuerwehr um Punktdaten handelt, wird ein Einsatzradius von zum Beispiel 10 bis 20 Metern festgelegt. Es muss anschließend ausgewertet

werden, wie sich die Gefährdungsklassen flächentechnisch in dem jeweiligen Einsatzradius verteilen. Dieses Verfahren birgt jedoch methodische Unsicherheiten, da ein Einsatzradius unter Umständen in ein Gebiet mehrerer Senkeneinzugsgebietsgrenzen fallen kann. Wasserscheiden würden somit nicht berücksichtigt (Scheid, 2018).

Die Abbildungen 9 und 10 zeigen Feuerwehreinsätze im Rhein-Main-Gebiet, die aus einem Starkniederschlag vom 30.05.2018 resultierten (Kutschker, 2019). Aus den Karten wird ersichtlich, dass das Gebiet mit den größten Niederschlagsintensitäten nicht zwingend auch das mit den meisten Einsätzen sein muss. Neben den Gründen, die unter Umständen gar nicht im Zusammenhang mit dem Starkregen stehen, führen häufig folgende Bedingungen zu einer Verschiebung der Niederschlags- und Einsatzorte. Fällt ein Starkregen über einer Region, die eher eine ländlichere Infrastruktur und somit weniger versiegelte Flächen aufweist, kann das Wasser schneller und ortsnah versickern. Bei urbanen Flächen mit hohem Versiegelungsanteil reichen wiederum geringe Niederschlagsintensitäten aus, um Einsätze von Feuerwehr und Technischen Hilfswerken zu verursachen (Kutschker, 2019). Auch die bereits erwähnten Entwässerungsleistungen spielen bei der Bewältigung großer Wassermassen innerhalb kurzer Zeit eine Rolle. So stoßen dünner besiedelte Regionen schneller an ihre hydraulischen Leistungsgrenzen und lassen folglich sogar Wasser an die Oberfläche austreten (vgl. Kapitel 3.3.1 Hydrologisch-hydraulische Modellierungsansätze).

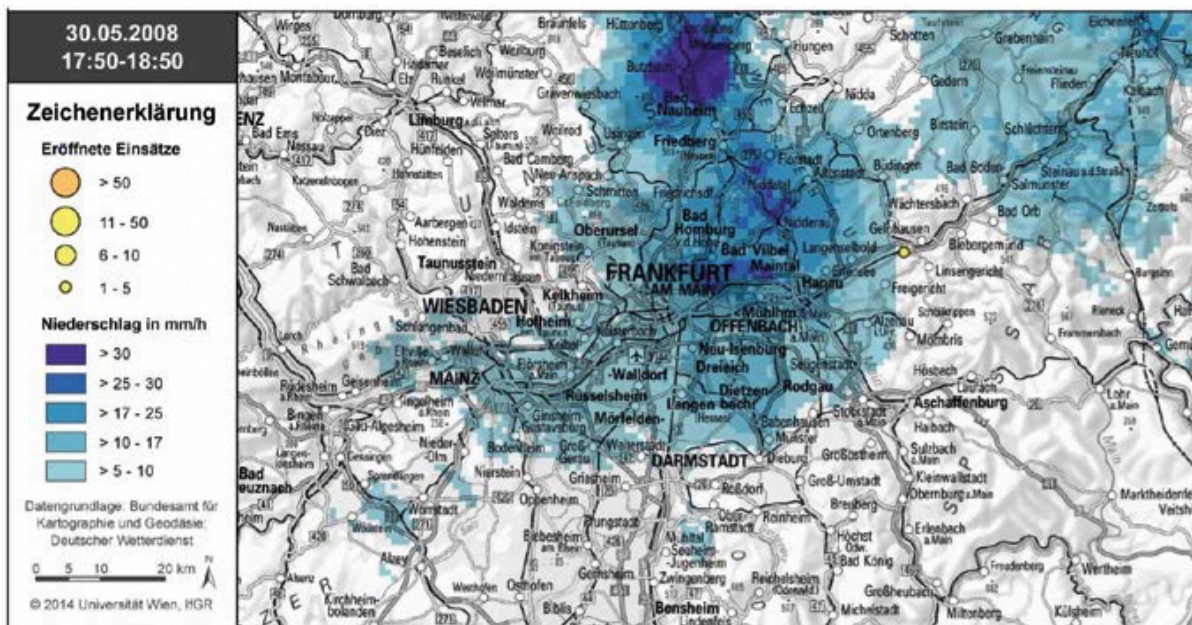


Abbildung 9: Starkregenereignis am 30.05.2018 im Rhein-Main-Gebiet (Kutschker, 2018)

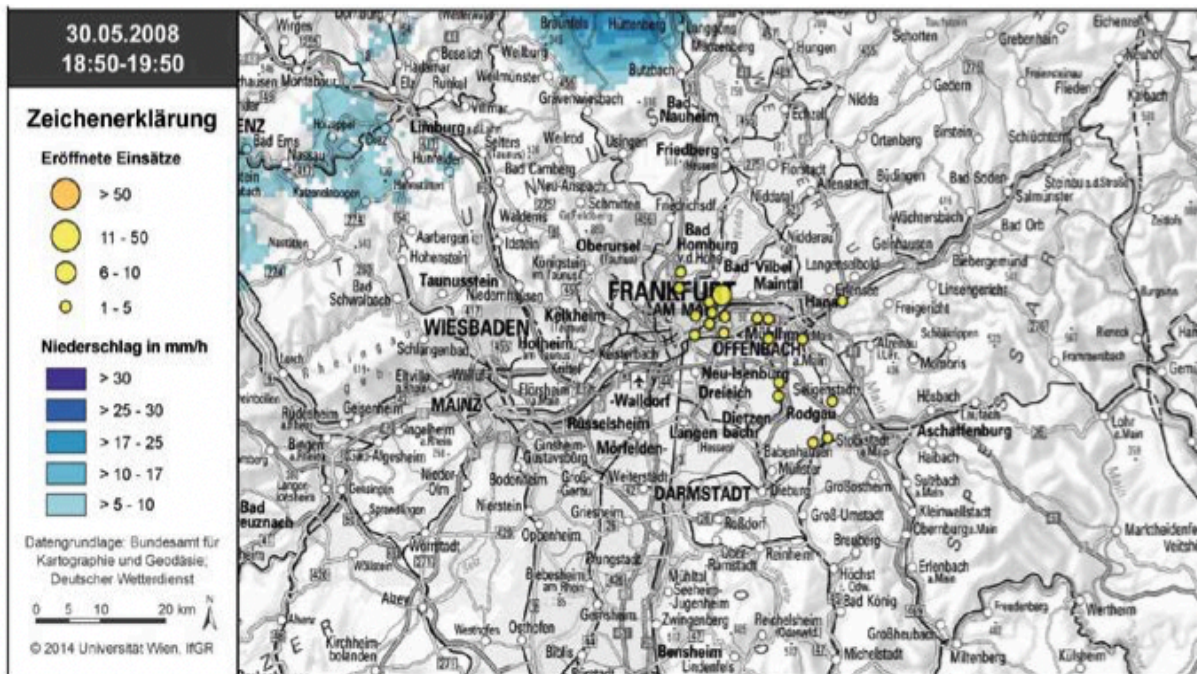


Abbildung 10: Resultierende Feuerwehreinsätze aus dem vorangegangenen Starkregenereignis etwa eine Stunde zeitversetzt (Kutschker, 2018)

Erfasst werden die Einsatzinformationen durch die jeweiligen Leitstellen des Landkreises oder der jeweiligen Stadt. In der Regel werden sie durch ein Einsatzleitersystem elektronisch unterstützt (Scheid, 2018). Die Leitstellen unterliegen den Ministerien oder den Behörden für Inneres und Sport. Je nach Verordnung des Bundeslandes werden die Daten, die unter Umständen personenbezogen sein können, für bestimmte Zeiten gespeichert. Im Bundesland Hessen erfolgt eine Kategorisierung der Notrufe beispielsweise durch sogenannte Einsatzstichworte, welche durch das Hessische Ministerium erlassen werden. Ein Starkregenereignis, bei dem überwiegend Meldebilder wie Straßensperren durch umgestürzte Bäume, Überflutungen oder vollgelaufene Keller gemeldet werden, würde dem Einsatzstichwort "H 1" zugeordnet. Dieses umfasst überwiegend kleinere Einsätze (siehe Tabelle 11).

Tabelle 11: Meldebilder zum Einsatzstichwort "H 1" des Bundeslandes Hessen (Kutschker, 2019)

Einsatzstichworte für Hilfeleistungen	
Einsatzstichwort	Meldebild
H 1	<ul style="list-style-type: none"> • Wasser im Keller • Wasserrohrbruch • Tür- und Fenstersicherung • Baum oder Gegenstand auf der Straße • Tier in Not oder Unfall mit Tier • Einfache technische Hilfeleistung an Bächen, Seen oder Hafengebieten • Ölspur • Kleine Mengen Betriebsstoffe aufnehmen • Ähnliche Meldebilder

Die Auswertung der Einsatzstichworte zur Erfassung Gefahrenhotspots birgt jedoch auch einige Schwierigkeiten, denn viele Bundesländer führen keine Einsatzstichworte für Unwetterlagen (Kutschker, 2019). Und auch beim hessischen Einsatzstichwort "H 1" werden Meldungen, wie Ölsuren oder Nottüröffnungen, geführt, die in den meisten Fällen nicht in einem Zusammenhang mit einem Starkregen stehen. Dies erschwert die Zuordnung und Sortierung der Einsatzzahlen zusätzlich (Kutschker, 2019).

Die Hauptproblematik bei der Verwendung einsatzbasierter Daten von Feuerwehr- oder Rettungsdiensten liegt allerdings darin, dass sie den strengen Datenschutzgesetzen unterliegen. Sie enthalten neben den Informationen zu Einsatzstichwort und Meldebild weitere Angaben wie Einsatzort, Einsatzdauer und eingesetzte Fahrzeuge, weshalb sie in der Regel nur intern zu statistischen Auswertungen genutzt und nicht vom Einsatzleitreechner weitergegeben werden. Um die Einsatzinformationen in Starkregenkarten zu implementieren, müsste zukünftig eine bundesweite Freigabe anonymisierter Daten zu Forschungszwecken und Gefahrenprävention erfolgen (Scheid, 2018).

3.3.4 Stations- und radargestützte Regendaten

Der überwiegende Teil der in Kapitel "3.1 Aktuell veröffentlichte Starkregenkarten" vorgestellten Karten, verwenden für die Darstellung der Niederschlagshöhen die stationsbasierten Datenreihen des KOSTRA-DWD-2010R. Da Niederschlagssammler jedoch nur punktuell und an ausgewählten Orten installiert werden können, ist die Nichterfassung einiger räumlich begrenzter Regenfälle eine logische Folge. Nach Seuffert (2002) verfehlen die durch die Niederschlagssammler erfassten Regendaten die wahren Werte um etwa 80 bis 100 Prozent. Die Radarmessung gilt als genauere Methode der Niederschlagserfassung (Seuffert, 2004). Mit dem Radar ist es möglich, Niederschlagssummen ohne Datenverlust zu erhalten, die sowohl dreidimensional als auch zeitlich, eine hohe Auflösung besitzen (Seuffert, 2004). Allerdings stehen sie aufgrund ihrer relativ kurzen Zeitreihen (ab 2001) noch in der Kritik. Eine Veröffentlichung von Lengfeld et al. (2020) legt dennoch nahe, warum eine Verwendung der Radardaten sinnvoll ist. Im Zeitraum von 2001 bis 2018 sind etwa 17,3 Prozent der stündlichen Starkregenfälle in Deutschland durch Niederschlagsmesser erfasst worden, während 81,8 Prozent der über den Tag andauernden Starkregen registriert werden konnten (Lengfeld et al., 2020).

Da es sich bei Starkregen meist um kurzweilige, starke sowie konvektive Ergüsse handelt, sind gerade die Zeiträume über 1 bis 2 Stunden für ein Risikomanagement besonders essenziell. Zur Überprüfung der Aussagekraft der radar- und stationsbezogenen Regendaten werden in Kapitel „4.1 Senken- und Fließweganalyse zur Bewertung der Aussagekraft von Niederschlagshöhen aus KOSTRA-DWD-2010R und RADOLAN“ mittels Berechnungen tatsächlich eingetretene Niederschlagshöhen mit ihren Prognosen aus KOSTRA-DWD-2010R und RADOLAN überprüft.

3.4 Besondere Notwendigkeit einer Starkregenhinweiskarte für die Stadt Hamburg

Hamburg ist eine wachsende Metropolregion. Bis 2040 wird für Hamburg mit einem Bevölkerungsanstieg von 1,831 Millionen Menschen auf 1,949 gerechnet (Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein, 2019). Die Schaffung von weiterem Wohnraum und die Versiegelung freier Flächen sind eine logische Folge (Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein, 2019). Eine weitere Besonderheit bietet die Hansestadt durch ihre vielen Binnengewässer. Im Normalfall bilden sie bei Starkregenereignissen natürliche Rückhalteflächen und können große Wassermengen zwischenspeichern (Freie und Hansestadt Hamburg, 2014). Diese natürlichen Rückhalteflächen sind zum Teil durch Ausweisung von Überschwemmungsgebieten rechtlich gesichert. Sie müssen von baulichen Anlagen freigehalten werden, um weiterhin ihre Funktion erfüllen zu können (Freie und Hansestadt Hamburg, 2014).

In Hamburg ist also ein uneingeschränktes städtisches Wachstum nicht möglich und gleichzeitig eine stetige Anpassung an zukünftige klimatische Entwicklungen erforderlich.

Durch das Projekt RISA (RegenInfrastrukturAnpassung) findet das Thema Starkregen in der Freien und Hansestadt Hamburg Berücksichtigung. In Zusammenarbeit mit HAMBURG WASSER passt man sich an extreme Regenereignisse an, mit dem Ziel, bereits im Prozess der Stadtplanung die Gefahr durch Überflutungen zu minimieren und gleichzeitig städtisches Wachstum weiterhin zu ermöglichen (RISA, 2020; RISA, 2015). So soll sich Hamburg langfristig zur „Schwammstadt“ entwickeln, um Wassermassen kurzfristig aufnehmen und sie ortsnah kontrolliert wieder abgeben zu können (RISA, 2020).

Für eine ganzheitliche Betrachtung aller einfließenden Faktoren ist die Kombination der Themenfelder Wasserhaushalt, Landschaft und Städtebau notwendig. Das Ergebnis der Verknüpfung kann als Planungs- und Entscheidungsgrundlage dienen (siehe Abbildung 11; RISA, 2015).

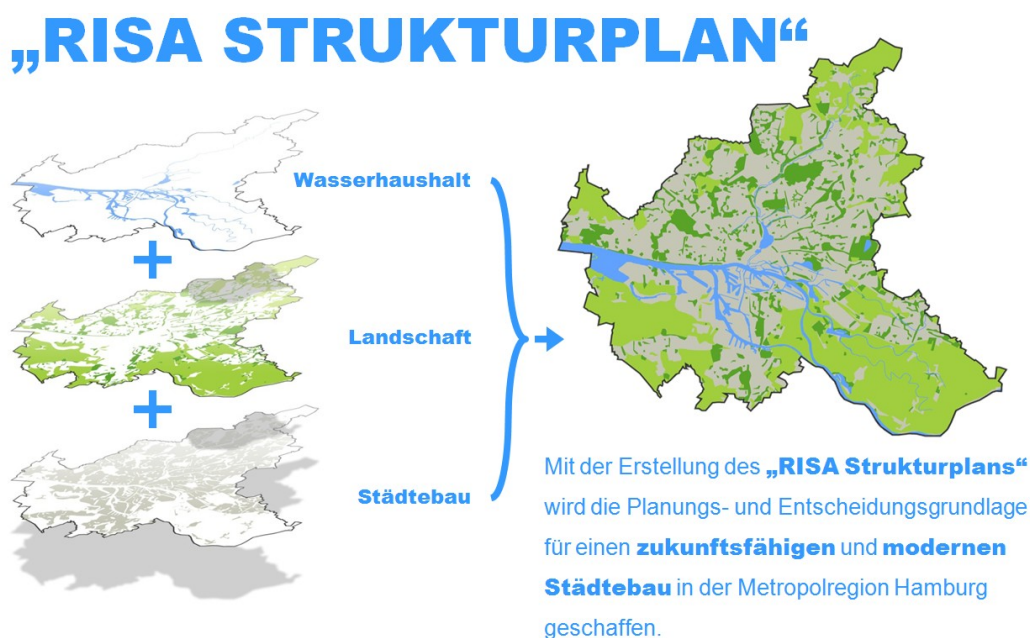


Abbildung 11: Themenfelder des RISA Strukturplans für den Umgang mit Starkregen (RISA, 2015)

Die in Abbildung 11 gezeigten Verknüpfungen können in weiteren drei Umsetzungsschritten erfolgen.

3.4.1 Naturnaher lokaler Wasserhaushalt

Dieser Umsetzungsschritt beinhaltet hauptsächlich die drei Komponenten des Oberflächenabflusses, der Versickerung und der Verdunstung (RISA, 2015). Je nach Beschaffenheit einer Gegend hinsichtlich der Geländeneigung, der Bodenbeschaffenheit, der Grundwasserverhältnisse, des Bewuchses und der Witterung, variieren die Verhältnisse jedoch stark. Eine flächendeckende Erfassung dieser Verhältnisse und der anschließende Vergleich mit einem vorher definierten naturnahen Referenzzustand lässt Bilanzierungen und Analysen zum Wasserhaushalt zu. Als naturnaher Referenzzustand dient dabei eine unbebaute und unversiegelte Fläche (RISA, 2015).

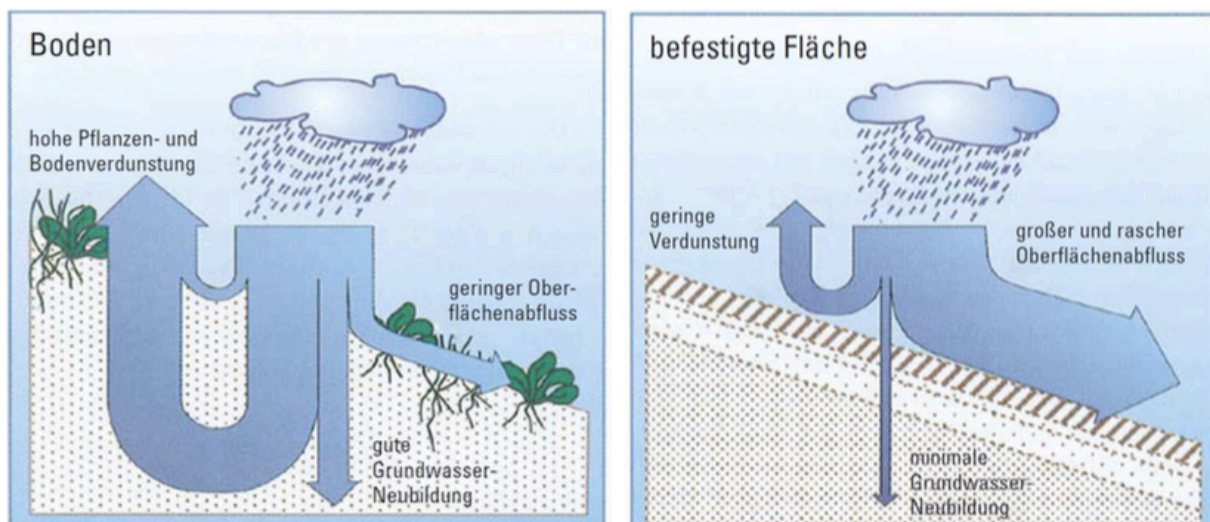


Abbildung 12: Vergleich der Bilanzen: Referenzzustand (links), verbaute Fläche (rechts) (RISA, 2015)

Im Zuge der eingangs erwähnten Nachverdichtung und Versiegelung der städtischen Flächen verschieben sich die Verhältnisse zu Gunsten des Oberflächenabflusses (siehe Abbildung 12). Gleichzeitig werden Versickerungs- und Verdunstungspotenziale durch den Rückbau von Vegetation und Freiflächen reduziert. Die Verlagerungen dieser Verhältnisse können so als Indikatoren für ein gesundes beziehungsweise ungesundes Wachstum mit in die Entscheidung städteplanerischer Maßnahmen einfließen (RISA, 2015).

3.4.2 Weitergehender Gewässerschutz

Der Oberflächenabfluss ist nach Regenfällen besonders in Siedlungsgebieten und stark urbanisierten Flächen mit Schadstoffen belastet (RISA, 2015). Dennoch erfolgt die Entwässerung über Trennsysteme. Im Stadtzentrum Hamburgs sind es in der Regel die Binnengewässer, die diese hydraulische Leistung erbringen. Folglich können Oberflächengewässer und Grundwasser durch den Schmutzeintrag verunreinigt werden. Zur besseren Übersicht möglicher Belastungen im abfließenden Regenwasser, müssen Flächen auf ihr Potenzial überprüft werden, als Verunreiniger zu wirken. Eintragspfade gibt es viele, so können Kläranlagenabläufe, Überläufe aus Mischwassersielnetzen, Auslässe aus Regenwassersielnetzen sowie Straßen-

entwässerungsanlagen als Zugang in den Umweltkreislauf fungieren. Die Bewertung erfolgt durch die Bilanzierung des potentiellen Schmutzfrachtabtrags der betroffenen Flächen. Maßnahmen zur Vermeidung oder Rückhaltung der Schadstoffe sind zum Beispiel naturnahe Regenwasserbehandlungsanlagen, die als Retentionsbodenfilter fungieren können (RISA, 2015).

3.4.3 Überflutungs- und Binnenhochwasserschutz

In Hamburg ist in Zukunft mit Überflutungen als Folge hydraulischer Überlastung des Entwässerungssystems durch zunehmende Starkregenereignisse zu rechnen (RISA, 2015). Daher müssen Sielnetze, Gräben, Gewässer, Grundstücksentwässerungen stetig an diese Entwicklung angepasst werden (RISA, 2015). Ein geeignetes Instrument dafür stellen die bereits ausführlich erwähnten Gefahren- und Schadenspotenzialanalysen dar (RISA, 2015). Die Analysen erfolgen ebenfalls über GIS-basierte Informationssysteme. Die Gefahrenanalysen umfassen Senken- und Fließwegbestimmung, sowie die Erfassung von Überstauinformationen des Kanalnetzes. Abgeleitet werden sie aus den Eckdaten "Dauer" und "Intensität eines Starkregens". Die Schadensanalysen erfassen weiterführende Informationen wie Vulnerabilität einer Region für Schutzgüter wie Gesundheit, Umwelt, Kulturerbe, Wirtschaft und/oder Sachwerte. Die Schnittmenge aus beiden Analyseschritten ergibt das Gesamtrisiko einer Region. Trifft beispielsweise eine Senke mit einem besonders hochwertigen Schutzgut zusammen, so gilt in diesem Gebiet ein erhöhtes Überflutungsrisiko. Auch hier gilt es die statistischen Unsicherheiten mittels Validierungen, beispielsweise durch die Auswertung von Feuerwehreinsätzen, möglichst gering zu halten (RISA, 2015).

4 Material und Methoden

4.1 Senken- und Fließweganalyse zur Bewertung der Aussagekraft von Niederschlagshöhen aus KOSTRA-DWD-2010R und RADOLAN

Verglichen werden die entgeltfreien Starkniederschlagsreihen des Deutschen Wetterdienstes anhand ausgewählter Starkregenereignisse der letzten Jahre im Raum Hamburg. Dafür werden die Daten aus KOSTRA-DWD-2010R, sowie die radarbasierten Daten des Routineverfahrens RADOLAN jeweils mit Hilfe der Simulationssoftware ArcMap 10.5.1 über dem Raum Hamburg projiziert und die Niederschlagswerte werden an den entsprechenden Orten der Starkregenereignisse entnommen. Parallel wurde mittels eines Digitalen Geländemodells mit einer Auflösung von 1x1 Meter und ArcMap 10.5.1 eine Fließweg- und Senkenanalyse durchgeführt, um potenzielle Einstaugebiete für das Wasser im Stadtgebiet kenntlich zu machen.

Anschließend werden die in den in situ-Aufnahmen zu erkennenden Einstauhöhen mit den erstellten Kartenwerken in Verbindung gebracht. Genauer wird die Niederschlagsmenge, die auf das Einzugsgebiet einer Senke fällt, aufsummiert und auf die in den Bildaufnahmen zu erkennende überflutete Fläche umgerechnet. Dadurch wird die Niederschlagsmenge aus den Datenreihen ortsbezogen und systematisch in einen raumzeitlichen Kontext gebracht und validiert.

4.1.1 Raumzeitliche Dokumentation der Starkregenereignisse

Durch die gezielte Auswertung umfangreicher Medienberichterstattung und Beiträgen in sozialen Netzwerken ließen sich drei Ereignisse der letzten Jahre an jeweils zwei Standorten in Hamburg detailliert rekonstruieren. Für die Auswertung wurden die folgenden drei Starkregenereignisse überprüft:

Tabelle 12: Tabelle zum Starkregenereignis 1


Starkregenereignis 1	
	
<p>Abbildung 13: Starkregenereignis 1: Mühlenkamp, Ecke Gertigstraße etwa um 17:45 (links; Abendblatt, 2011), Amsinckstraße etwa um 17:35 (rechts; Tagesschau, 2011)</p>	
Datum, Uhrzeit	06.06.2011, 16:30 bis 17:40
Dauer	70 Minuten
Betroffene Regionen	Osten Hamburgs

Tabelle 13: Tabelle zum Starkregenereignis 2

Starkregenereignis 2	
	
<p>Abbildung 14: Eppendorfer Weg etwa um 19:05 (links; Spiegel, 2016), Am Moorkamp etwa um 18:45 (rechts; Abendblatt, 2016)</p>	
Datum, Uhrzeit	14.06.2016, 16:50 bis 17:50
Dauer	60 Minuten
Betroffene Regionen	Westen Hamburgs

Tabelle 14: Tabelle zum Starkregenereignis 3

Starkregenereignis 3



Abbildung 15: Am Beckerkamp, Ecke Bornmühlenweg etwa um 17:00 (links), Billwerder Straße, Ecke Heckkatenweg etwa um 17:00 (rechts; Bergedorfer Zeitung, 2018 und 2018a)

Datum, Uhrzeit	10.05.2018, 15:30 bis 17:00
Dauer	90 Minuten
Betroffene Regionen	Süden und Osten Hamburgs

4.1.2 Geobasisdaten und Senken- und Fließweganalyse

Die Geodaten der Freien und Hansestadt Hamburg bilden die Grundlage für die Modellierung der Fließweg- und Senkenanalyse. Für eine möglichst realitätsnahe Simulation der städtischen Bedingungen wurde ein Digitales Geländemodell aus einer Laserscan-Befliegung des Landesbetriebs Geoinformation und Vermessung (LGV) aus dem Jahr 2017 verwandt (Abbildung 16). Das Geländemodell liegt im 1x1-Meter-Rasterformat vor und sorgt somit für eine ausreichend genaue Darstellung potenzieller Einstaumöglichkeiten in der Stadt.



Abbildung 16: Digitales Geländemodell auf Basis eines 1x1-Meter-Geländemodells der Hansestadt Hamburg (LGV, 2017)

Mithilfe der Simulationssoftware Arc-Map 10.5.1 wurde auf Basis des Geländemodells eine Fließweganalyse durchgeführt. Bei der Fließweganalyse werden die Raster des Eingabeformats (Abbildung 17, links) auf die Höhenunterschiede in Z-Richtung überprüft: Hoch



Abbildung 17: Beispielhafte Verteilung der Abflusswerte (rechts) bei entsprechender Eingabe von Höhenwerten (links) (ArcGIS, 2016)

gelegene Geländepunkte werden dabei mit einer hohen Zahl versehen, niedrig gelegene Punkte mit einer niedrigen.

Aus diesen Höhenpunkten ergibt sich die Fließweganalyse (Abbildung 17, rechts). Die Zellen erhalten hier einen hohen Wert, wenn vermehrter Abfluss aus anderen Zellen in ihre Richtung droht. Sie erhalten wiederum einen niedrigen Wert, wenn ein Abfluss in eine tiefergelegene Zelle möglich ist. Auf diese Weise veranschaulicht Abbildung 17 die Auswertungsmethodik der Fließweganalyse nach ArcGIS. Das Ergebnis ist ein Fließweganalyse-Raster, welches als Grundlage für den nächsten Schritt der Senkenanalyse dient. Hier werden Zellen oder Zellenverbunde gesucht, die niedriger als die Werte aller sie umgebenden Zellen sind. Ebenfalls wurden die Einzugsgebiete jeder Senke berechnet, damit die Niederschlagsmengen für den betroffenen Raum der Senke aufsummiert werden können.

Abbildung 18 zeigt das Ergebnis der Fließweg- und Senkenanalyse für die Freie und Hansestadt Hamburg. Dunkelblau markierte Pixel signalisieren die Position der Senken. Diese werden von hellblauen Linien umrandet, die die Einzugsgebiete einer jeweiligen Senke markieren.

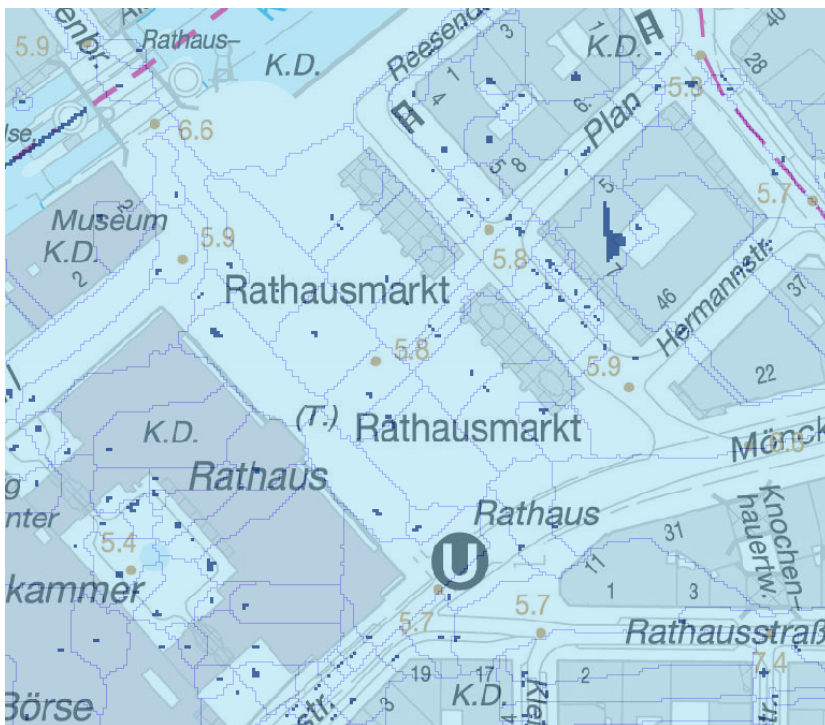


Abbildung 18: Ausschnitt einer Fließweg- und Senkenanalyse auf Basis eines 1x1-Meter-Geländemodells der Hansestadt Hamburg

4.1.3 Niederschlagshöhen aus KOSTRA-DWD-2010R und RADOLAN

Mittels derselben Modellierungssoftware wurden im Folgenden auch die Niederschlagsdaten aus RADOLAN und KOSTRA-DWD-2010R des DWD kartografisch dargestellt (siehe Abbildung 19).

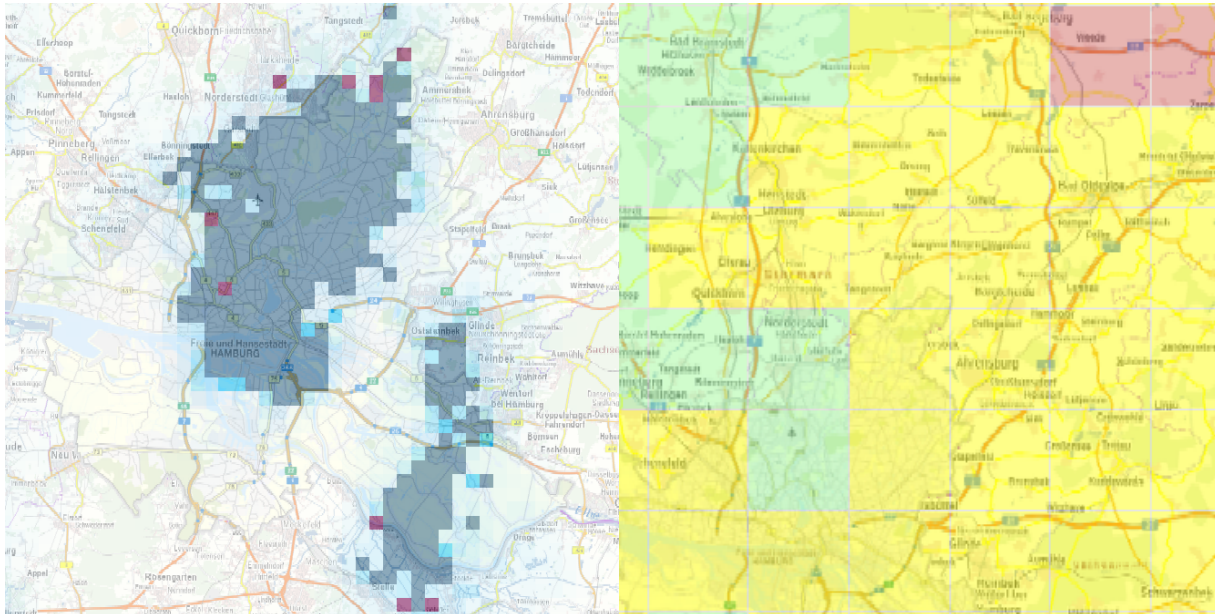


Abbildung 19: Darstellung eines mit RADOLAN erfassten Niederschlags über dem Raum Hamburg mit einer Auflösung von 1x1 Kilometer (links), Darstellung eines Niederschlags aus KOSTRA-DWD-2010R mit einer Auflösung von 67x67 Kilometer über dem Raum Hamburg (rechts)

Die beiden Datenreihen unterscheiden sich in ihrer Auflösung stark. So beträgt die Rasterweite bei den KOSTRA-DWD-Rasterdaten 67x67 Kilometer und bei dem Routineverfahren RADOLAN 1x1 Kilometer. Damit ist bei der Verwendung des Routineverfahrens eine räumlich genauere Differenzierung von Regenmengen in einem Gebiet möglich.

Ein weiterer Unterschied der beiden Datenreihen liegt in der Bereitstellung. Die Rasterdaten aus KOSTRA-DWD-2010R werden auf Basis der Dauer eines Ereignisses ausgewählt. Danach stehen für die gewählte Dauerstufe statistische Niederschlagshöhen der Jährlichkeiten $T_n = 1$ a, $T_n = 2$ a, $T_n = 3$ a, $T_n = 5$ a, $T_n = 10$ a, $T_n = 20$ a, $T_n = 30$ a, $T_n = 50$ a und $T_n = 100$ a zur Verfügung.

Bei den Rasterdaten des Routineverfahrens RADOLAN hingegen, können Stunden- oder Tagessummen für jeden Tag der vergangenen 19 Jahre ausgewählt werden. Sie liefern im Vergleich jedoch nur die Niederschlagshöhen und nehmen keine Einordnung bezüglich Wiederkehrzeit oder Dauerstufe vor.

Um die Ereignisdaten aus dem Routineverfahren RADOLAN mit den statistischen KOSTRA-DWD-2010R-Daten vergleichen zu können, wurde auf Grundlage der Regensummen aus den radargestützten Daten ein Äquivalent in den stationsbasierten Niederschlagsmengen gesucht.

4.1.4 Ermittlung der Einzugsgebiete, der Überflutungsflächen und Berechnung der Einstauhöhen

Die Senken und die dazugehörigen Einzugsgebiete wurden wie bereits erläutert mit ArcMap simuliert. Durch Anklicken des gewünschten Einzugsgebietes konnte die Ausdehnung in Quadratmetern für die Berechnung der Einstauhöhen entnommen werden. Für die Auswertung eines Starkregenereignisses wurden alle Einzugsgebiete aufsummiert, die zu der Überflutung beitragen (vgl. Abbildung



Abbildung 20: Einzugsgebiet aller relevanten Senken, die zur Überflutung in der Amsinckstraße 2011 beitrugen (rechts), Bestimmung der überfluteten Flächen mittels des Vermessungswerkzeugs des Hamburger Geoportals (links)

20). Um die Größe der überfluteten Flächen zu bestimmen, wurde das GIS-basierte Vermessungswerkzeug des Hamburger Geoportals benutzt (vgl. Abbildung 20, links). Hier wurde die Fläche ausgesucht, die auf den Fotos eindeutig interpretierbar überflutet war.

Im Sinne der Übersichtlichkeit wird im Folgenden auf die Verwendung der Screenshots aus dem Modellierungsprogramm verzichtet und es werden nur noch die Daten tabellarisch für jedes Ereignis dargestellt. Im Anhang finden sich alle relevanten Screenshots der Modellierungen (vgl. Kapitel „2 Einzugsgebiete und überflutete Flächen“).

Zur Bestimmung der Einstautiefen wird die maximale Fläche des Einzugsgebiets mit der jeweiligen Niederschlagsmenge multipliziert. Diese Volumenangabe pro Zeiteinheit wird durch die überflutete Fläche geteilt. Daraus ergibt sich die Einstauhöhe für die untersuchte Fläche.

$$Einstauhöhe = \frac{(Einzugsgebiet_{ges} \cdot Niederschlagshöhe)}{Überflutete\ Fläche}$$

Gleichung 4

4.1.5 Gegenüberstellung der Niederschlagshöhen aus KOSTRA-DWD-2010R und RADOLAN

Für die Ereignisse aus dem Jahr 2011 wurden folgende Daten aus den erstellten Niederschlags- und Simulationskarten entnommen:

Tabelle 15: Auswertung Amsinckstraße

Starkregenereignis 1 - Amsinckstraße		
Datenreihe	KOSTRA-DWD-2010R	RADOLAN
Niederschlagshöhen [l bzw. mm/h]	15,00	15,60
Fläche der Einzugsgebiete der beteiligten Senken [m ²]	2984,00	
Überflutete Fläche [m ²]	381,00	
Einstauhöhe [cm]	11,75	12,22

Tabelle 16: Auswertung Mühlenkamp

Starkregenereignis 1 - Mühlenkamp, Ecke Geritstraße		
Datenreihe	KOSTRA-DWD-2010R	RADOLAN
Niederschlagshöhen [l bzw. mm/h]	22,70	23,20
Fläche der Einzugsgebiete der beteiligten Senken [m ²]	4698,00	
Überflutete Fläche [m ²]	1237,00	
Einstauhöhe [cm]	8,62	8,81

Für die Ereignisse aus dem Jahr 2016 wurden folgende Daten aus den erstellten Niederschlags- und Simulationskarten entnommen:

Tabelle 17: Auswertung Eppendorfer Weg

Starkregenereignis 2 - Eppendorfer Landstraße, Ecke Lehnhartzstraße		
Datenreihe	KOSTRA-DWD-2010R	RADOLAN
Niederschlagshöhen [l bzw. mm/h]	15,00	15,10
Fläche der Einzugsgebiete der beteiligten Senken [m ²]	719,00	
Überflutete Fläche [m ²]	133,00	
Einstauhöhe [cm]	8,11	8,16

Tabelle 18: Auswertung Am Moorkamp

Starkregenereignis 2		
- Am Moorkamp		
Datenreihe	KOSTRA-DWD-2010R	RADOLAN
Niederschlagshöhen [l bzw. mm/h]	19,80	19,90
Fläche der Einzugsgebiete der beteiligten Senken [m ²]	943,00	
Überflutete Fläche [m ²]	230,00	
Einstauhöhe [cm]	8,18	8,16

Für die Ereignisse aus dem Jahr 2018 wurden folgende Daten aus den erstellten Niederschlags- und Simulationskarten entnommen:

Tabelle 19: Auswertung Am Beckerkamp

Starkregenereignis 3		
- Am Beckerkamp, Ecke Bornmühlenweg		
Datenreihe	KOSTRA-DWD-2010R	RADOLAN
Niederschlagshöhen [l bzw. mm/h]	49,30	108,00
Fläche der Einzugsgebiete der beteiligten Senken [m ²]	2915,00	
Überflutete Fläche [m ²]	600,00	
Einstauhöhe [cm]	23,95	52,47

Tabelle 20: Auswertung Heckkatenweg

Starkregenereignis 3		
- Heckkatenweg, Billwerder Straße		
Datenreihe	KOSTRA-DWD-2010R	RADOLAN
Niederschlagshöhen [l bzw. mm/h]	48,70	94,00
Fläche der Einzugsgebiete der beteiligten Senken [m ²]	2915,00	
Überflutete Fläche [m ²]	600,00	
Einstauhöhe [cm]	26,49	51,38

4.1.6 Interpretation der Ergebnisse

Grundsätzlich fällt auf, dass die statistischen Niederschlagsdaten aus dem KOSTRA-DWD-2010R-Datensatz fast immer ein Äquivalent zu den Radardaten aus dem Routineverfahren RADOLAN bieten. Lediglich bei besonders seltenen Regenereignissen mit statistischen Wiederkehrzeiten $T_n > 100$ a bleiben diese aus. Dass gerade diese jedoch wichtig sein können, zeigt die Auswertung des Starkregenereignisses 3 aus dem Jahr 2018. Vergleicht man die errechneten Einstauhöhen der beiden Datensätze mit der in situ-Aufnahme der Über-

schwemmung am Beckerkamp (Abbildung 15, Feuerwehrleute stehen knietief im Wasser), so ist der Wert von 51,38 Zentimetern eine realistischere Angabe als 26,49 Zentimeter.

Auffällig ist indes auch, dass bei dem gleichen Ereignis am zweiten Standort (Heckkatzenweg, Ecke Billwerder Straße; Abbildung 15) die Berechnung beider Datensätze unrealistisch und nicht passend erscheint. Die Fahrbahn ist etwa bis zur Bordsteinkante überschwemmt und in der Mitte der Kreuzung sieht man einen Teil der Bremsschwelle der Fahrbahn. Es ist davon auszugehen, dass weder Bremsschwelle noch Bürgersteig 26,49 oder 51,38 Zentimeter hoch sind. Die Berechnungen stimmen somit nicht mit den tatsächlichen Überschwemmungen überein.

Nennenswert ist auch, dass die Einstauhöhen für alle Standorte der Ereignisse 1 und 2 etwa acht Zentimeter betragen. Alle Autos in den entsprechenden in situ-Aufnahmen stehen ungefähr bis zum Ansatz der Felge unter Wasser, daher werden acht Zentimeter Einstauhöhe als passend betrachtet. Eine Ausnahme bildet das Starkregenereignis in der Amsinckstraße. Hier ist davon auszugehen, dass die Fahrbahn etwas tiefer unter Wasser steht, zumindest am äußeren Straßenrand.

4.1.7 Fehlerdiskussion

Wie bereits in Kapitel „3.3.3 Feuerwehreinsätze“ bringen die GIS-Modellierungen Ungenauigkeiten mit sich. Auch in diesem Fall ist davon auszugehen, dass sich die Senkenanalyse durch kleine Dokumentationsfehler im digitalen Geländemodell verfälscht. Auch sind die darauf basierenden Einzugsgebiete der Senken unter Umständen mit Ungenauigkeiten behaftet und müssen als mögliche Fehlerquelle aufgeführt werden.

Es lassen sich somit alle Ereignisse zwar raumzeitlich lückenlos rekonstruieren, jedoch limitiert mangelhaftes Fotomaterial die Auswertung hinsichtlich der Bestimmung von überfluteten Flächen. Hier gilt, je mehr aussagekräftiges Fotomaterial etwa aus verschiedenen Perspektiven zur Verfügung steht, desto besser lassen sich derartige Auswertungen anstellen.

Ein weiterer Aspekt, der als Fehlerquelle aufgeführt werden muss, ist die Vernachlässigung der Entwässerungsleistung durch die Kanalisation. Diese Tatsache führt in den meisten Fällen dazu, dass simulierte Einstauhöhen zu hoch ausfallen und somit überschätzt werden. In den betrachteten Szenarien ist hiervon allerdings nicht auszugehen, da die berechneten Wasserhöhen den tatsächlichen Wasserstand gut wiedergeben. Vielmehr ist davon auszugehen, dass bei den gewählten Regenfällen, wie in Kapitel „3.3.1 Hydrologisch-hydraulische Modellierungsansätze“ erwähnt, die Kanalisation an Bedeutung verliert. Durch Überlastung ist diese nicht länger in der Lage weitere Wassermengen aufzunehmen. Eine Folge ist, dass das gesamte Wasser auf der Oberfläche verweilt.

4.2 Prüfung der Voraussetzungen für die Umsetzbarkeit einer erweiterten Starkregenkarte für Hamburg

In diesem Abschnitt wird die Umsetzbarkeit für die Konzipierung einer erweiterten Karte für den Raum Hamburg geprüft. Diese Karte soll sowohl Bürgerinnen und Bürgern, als auch städteplanerischen Entscheidungsträgern die Möglichkeit bieten, eine bestmögliche Vorsor-

ge angesichts der Folgen von Starkregen zu betreiben. Dafür werden die theoretischen Grundlagen und die weiterführenden Informationen aus den vorangegangenen Kapiteln zusammengeführt und auf Umsetzbarkeit geprüft.

4.2.1 Datengrundlage und weiterführende Informationen

Die zu prüfende Datengrundlage sowie die weiterführenden Informationen enthalten folgende Punkte:

- Datengrundlage für Niederschläge (radar- oder stationsgestützt)
- Bereitstellungswege
- Datengrundlage für Modellierungen
 - o Verwendung digitaler Geländemodelle
 - o Berücksichtigung hydrologisch-hydraulischer Komponenten
 - o Bewertungsmethodik für Niederschläge
- Implementierung von Feuerwehreinsätzen
- Schadens- und Maßnahmendokumentation

4.2.2 Umsetzbarkeit in einer Starkregenkarte

Als Datengrundlage für die Wiedergabe von Niederschlägen sollte auf Radardaten zurückgegriffen werden. Veröffentlichungen von Lengfeld et al. (2020), Seuffert (2004) und die Ergebnisse der eigenen Überprüfung aus Kapitel „3.3.4 Stations- und radargestützte Regendaten“ zeigen, dass Radardaten genauere Rückschlüsse über tatsächlich gefallene Regenmengen liefern. Durch den DWD werden diese mit dem entgeltfreien Routineverfahren RADOLAN zur Verfügung gestellt.

Als Grundlage zur Visualisierung dient die ArcGIS-Anwendung, damit können verschiedene Geodaten einer Region integriert und analysiert werden. Diese Geodaten liegen meist auf kommunaler, städtischer oder auf Landesebene GIS-kompatibel vor und erweitern somit einfach den Informationsgehalt einer Karte. Die Hintergrundkarte, und somit die Projektionsfläche, bildet das Layer „Stadtgebiet“ aus dem Hamburger Geoportal (www.geoportal-hamburg.de). Sie visualisiert das Amtliche Liegenschaftskatasterinformationssystem (ALKIS®) und das Amtliche Topographisch-Kartographische Informationssystem (ATKIS®). Mit der Verwendung dieses „Layers“ ist eine realitätsnahe und aktuelle Wiedergabe des Stadtbildes möglich.

Hinsichtlich der Verbesserung des naturnahen lokalen Wasserhaushaltes sind die Geodaten zu den Themen Versickerungs- und Verdunstungspotenzial und die Übersicht zum derzeitigen Versiegelungsstand im Hamburger Stadtgebiet relevant. Diese liegen im GIS-basierten Geoportal der Stadt Hamburg vor und können somit leicht in eine Starkregenkarte integriert werden.

Hamburg sieht sich in Zukunft als „Schwammstadt“, um gegen die Folgen des Klimawandels gewappnet zu sein. Angesichts dieser Tatsache ist ein Aufbau entsprechender Kartenwerke, die diese Funktion dokumentiert, erforderlich. Die georeferenzierte Kennzeichnung zum Beispiel von Regenrückhaltebecken oder von Flächen zur Oberflächenentwässerung in Flächen-

nutzungsplänen kann im Starkregenkontext zu einer Verstärkung der Aussagekraft von Karten führen, und gleichzeitig zur weiteren Sensibilisierung der Anwohner beitragen. Momentan stehen noch keine Kartenwerke bereit, die detaillierte Erläuterungen zur Nutzung der Fläche für den weitergehenden Gewässerschutz veranschaulichen. Eine GIS-basierte Kennzeichnung dieser Flächen ist jedoch auf Grundlage vorhandenen Karten- und Datenmaterials realisierbar.

Aktuell gibt es nur bedingt aussagekräftige Karten für den Raum Hamburg, die den Binnen- und Hochwasserschutz in den Kontext mit einem Starkregenereignis setzen. Regelmäßig werden Flusshochwassergefahrenkarten und -risikokarten im Rahmen der Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie (HWRM-RL) veröffentlicht (Freie und Hansestadt Hamburg, 2020). Diese Karten veranschaulichen das Verhalten der Hamburger Binnengewässer bei länger anhaltenden starken Regenfällen. Sie beschränken sich jedoch auf das unmittelbare Einzugsgebiet der Gewässer (Freie und Hansestadt Hamburg, 2020). Eine differenzierte Betrachtung der Flächen abseits von Gewässern ist damit nicht möglich.

Hamburg Wasser erarbeitete 2019 in Zusammenarbeit mit dem Projekt RISA der Freien und Hansestadt Hamburg einen Ansatz zur Darstellung von Starkniederschlagsereignissen in Hamburg (siehe Abbildung 21; Hamburg Wasser, 2019). Hierin werden Niederschläge basierend auf Radardaten ausgewertet und in Echtzeit wiedergegeben. Die Bewertung der Starkregenereignisse erfolgt nach Schmitt (vgl. Kapitel „2.4.2 Verfahren nach Schmitt“). Normale Regenfälle werden darüberhinaus mit einem Index kleiner eins wiedergegeben (Hamburg Wasser, 2019).

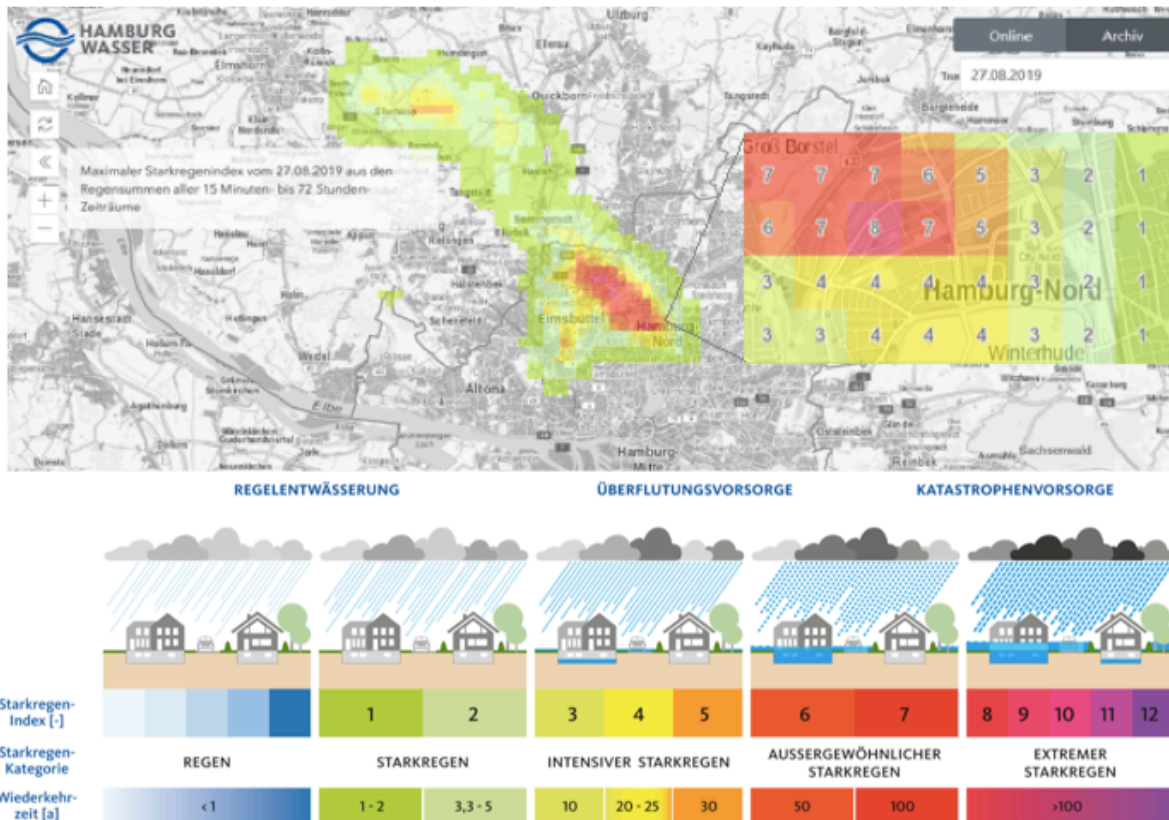
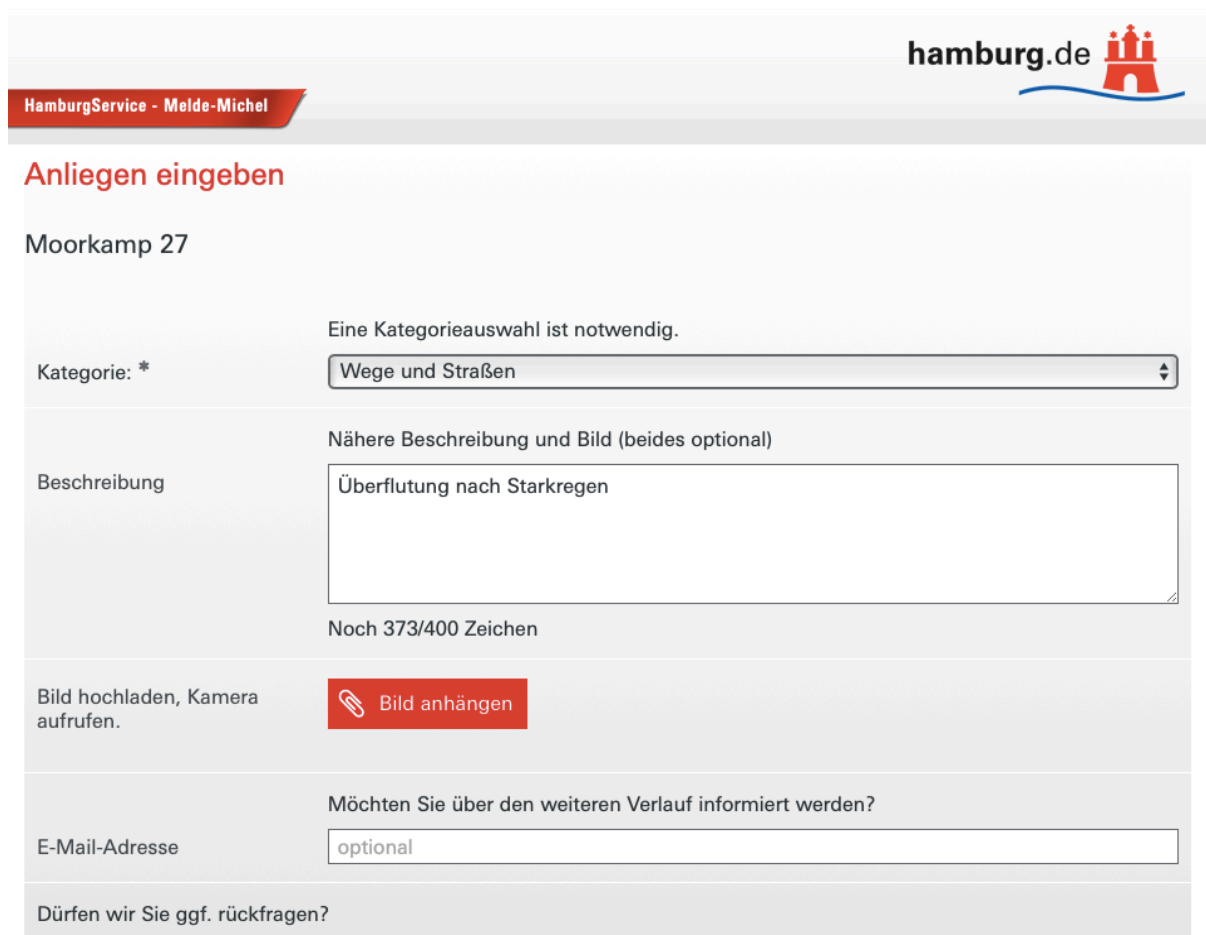


Abbildung 21: Die GIS-basierte Bewertungsplattform von Hamburg Wasser zeigt das Starkregenereignis vom 27.08.2019 mit einem Höchstwert von SRI 8 über Hamburg (Hamburg Nord) für einen Niederschlagszeitraum von 15 Minuten (Hamburg Wasser, 2019)

Es ist darauf hinzuweisen, dass die Plattform lediglich die Ergiebigkeit eines Niederschlags visualisiert und sie mittels Starkregenindex bewertet. Sie nimmt dabei keine Interpretation vulnerabler Stellen oder gefährdeter Bereiche vor.

Ein nächster Schritt kann die GIS-basierte Analyse der vorhandenen digitalen Geländemodelle sein. Damit können erwähnte Senken- und Fließwegauswertungen durchgeführt werden, die sich in einen Kontext mit den Niederschlagsdaten setzen lassen. Mittelfristig ist die Berücksichtigung der Kanalisation in der Modellierung ebenfalls ein wichtiger Aspekt, um eine realitätsnahe Simulation des Verhaltens von Wassermassen durch Starkregen gewährleisten zu können. Die technische Umsetzung einer solchen Starkregengefahrenkarte ist also möglich. Eine Umsetzung bedeutet aber auch, dass auf Grund der Größe der Stadt Hamburg enorme Rechenleistung benötigt würde, die hohe Kosten verursachen würde.

Das Einrichten einer Plattform zum Teilen von Schadens- und Maßnahmendokumentation ist in Hamburg bereits etabliert (Freie und Hansestadt Hamburg, 2020). Mit der Plattform "Melde-Michel" können sich Bürgerinnen und Bürger mit Anliegen aller Art an die Stadt wenden. Die Abbildungen 22 und 23 zeigen die Erfassungsmaske der Plattform und die anschließende Visualisierung im interaktiven Geoinformationssystem (Freie und Hansestadt Hamburg, 2020).



The screenshot shows the 'Melde-Michel' reporting interface. At the top right is the 'hamburg.de' logo. A red banner on the left reads 'HamburgService - Melde-Michel'. The main heading is 'Anliegen eingeben'. Below this, the location 'Moorkamp 27' is entered. A message states 'Eine Kategorieauswahl ist notwendig.' The 'Kategorie:' dropdown menu is set to 'Wege und Straßen'. The 'Beschreibung' field contains the text 'Überflutung nach Starkregen' and shows a character count of 'Noch 373/400 Zeichen'. There is a red button labeled 'Bild anhängen' with a paperclip icon. Below that, the question 'Möchten Sie über den weiteren Verlauf informiert werden?' is followed by an 'E-Mail-Adresse' field containing the text 'optional'. At the bottom, the question 'Dürfen wir Sie ggf. rückfragen?' is visible.

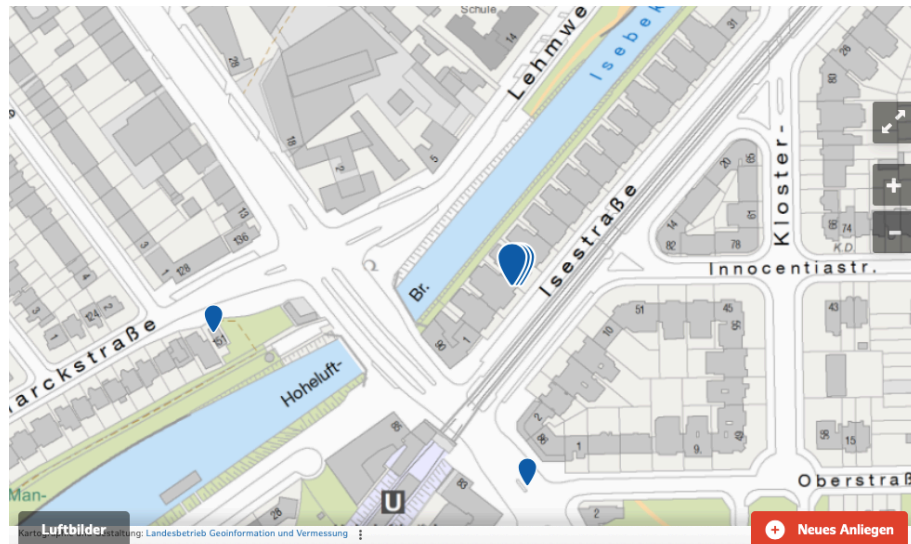
Abbildung 22: Städtische Erfassungsmaske des "Melde-Michels" zur Mitteilung von Schäden in Hamburg (Freie und Hansestadt Hamburg, 2020)

Schlagloch und Wegeschaden

In der Isestraße 1-31 gibt es etliche Gehwegschäden, d.h. unegale Gehwegplatten mit Stolpergefahr. Außerdem sind die Parkstreifen in einem sehr schlechten Zustand und sollten aufgeschüttet und befestigt werden. Bei Regen kann man teilweise nicht zwischen den Autos durchgehen, weil sich riesige Pfützen bilden. Ein gutes Bsp. ist die Innocentiastraße, wo bereits Ausbesserungen gemacht worden sind.

Rückmeldung

Grundsätzlich werden nur sicherheitsrelevante Schäden sofort behoben, andere Schäden nach vorhandener Zeit und vorhandenem Budget.



Gemeldet am: 12.05.2020
Status: Bearbeitet.

Abbildung 23: Abbildung einer Schadensmeldung in der Isestraße mit Rückmeldung der Stadt und Angabe des Bearbeitungsstatus (Freie und Hansestadt Hamburg, 2020)

Ähnlich wie auf der Internetseite Starkregengefahren.de werden die eingesandten Anliegen gespeichert und in den zuständigen Dienststellen in der Hamburger Verwaltung bearbeitet. Auf eine persönliche Registrierung wird hier im Vergleich zum “Melde-Michel” verzichtet, eine Prüfung der eingesandten Anträge erfolgt jedoch trotzdem. Abschließend werden die Anliegen kategorisiert und mit Rückmeldung und aktuellem Bearbeitungsstatus im Geoportal Hamburgs veröffentlicht.

Die Grundlage für die Integration dieser Plattform in eine Starkregenkarte wäre also auch hier GIS-basiert vorhanden. Durch den routinemäßigen Betrieb könnte ebenfalls auf Erfahrungswerte der Verwaltung hinsichtlich der Schadensmeldungen zurückgegriffen werden. Im Sinne der Übersichtlichkeit und Eindeutigkeit sollten Schadensmeldungen durch Starkregen jedoch gefiltert in einer Starkregenkarte dargestellt werden.

Die Integration von Feuerwehreinsätzen zur genaueren Analyse von Starkregenereignissen ist grundsätzlich möglich, da auch die Hamburger Feuerwehr Schadensbilder ihrer Einsätze erfasst und speichert (Feuerwehr Hamburg, 2019). Eine explizite Einordnung von Schäden durch Starkregen passiert jedoch nicht (Feuerwehr Hamburg, 2019). Zunächst müsste also wie in Kapitel „3.3.3 Feuerwehreinsätze“ erläutert, eine Einzelauswertung der Einsatzdaten erfolgen, um sie in den Kontext eines Starkregenereignisses bringen zu können. Das erfordert einen hohen Kommunikationsaufwand an der Schnittstelle zwischen Kartenbetreibern und Feuerwehren. Langfristig sollte also über eine einheitliche Erfassungsmethodik bei den Feuerwehren nachgedacht werden, um den Auswertungsprozess beschleunigen zu können. Dies wiederum würde die strukturelle Umstellung bewährter Praktiken bedeuten.

Die Tabelle 21 veranschaulicht noch einmal zusammengefasst die Umsetzbarkeit einer erweiterten Starkregenkarte für den Raum Hamburg. Die grüne Farbe signalisiert eine einfache Umsetzbarkeit, gelb und orange stehen dabei für eine kompliziertere, aber nicht unmögliche Realisierbarkeit.

Tabelle 21: Zusammenfassung der Daten- und Modellierungsgrundlage für eine erweiterte Starkregenkarte für Hamburg

Datenstamm	Darstellung	Umsetzung
Kartenbasis	GIS-basiert	ArcGIS
Niederschlagsdaten	Radar	RADOLAN des DWD, GIS-kompatibel vorhanden
Grundkarte	Stadtgebiet Hamburg	GIS-kompatible Layer aus Hamburger Geoportal
Datengrundlage für Kartenerweiterung		
Analysegrundlage	<ul style="list-style-type: none"> - Digitale Geländemodelle - Entwässerungspläne 	GIS-kompatibel vorhanden
Naturnaher lokaler Wasserhaushalt	<ul style="list-style-type: none"> - Versickerungspotenzialkarten - Verdunstungspotenzialkarten - Versiegelungsübersicht 	GIS-kompatible Layer aus Hamburger Geoportal
Weitergehender Gewässerschutz	<ul style="list-style-type: none"> - Potenzielle Verunreinigerleistung einer Region/ eines Gebiets - Einzeichnung getroffener Schutzmaßnahmen in bspw. Flächennutzungsplan 	GIS-kompatible Layer aus Hamburger Geoportal, Kennzeichnung multifunktionaler Flächen, teilweise vorhanden
Überflutungs- und Binnenhochwasserschutz	<ul style="list-style-type: none"> - Senken- und Fließweganalysen mit Berücksichtigung hydraulischer Entwässerungsleistung des Stadtgebiets, eines Gebiets, einer Siedlung oder Straße 	Nicht vorhanden, GIS-kompatibel umsetzbar, hoher Rechenaufwand je nach Detailgrad, kostenintensiv
Schadens- und Maßnahmenokumentation	<ul style="list-style-type: none"> - Georeferenzierte Detailinformationen über Folgen einzelner Starkregenereignissen 	Plattform mit „Melde-Michel“ vorhanden, GIS-kompatibel umsetzbar
Integration von Feuerwehreinsätzen	<ul style="list-style-type: none"> - Rückschlüsse auf besonders vulnerable Regionen und Gebiete - Validierung der Senken- und Fließweganalysen 	Einheitliche Erfassungsmethodik bei Feuerwehren nicht vorhanden, hoher Kommunikationsaufwand bei Etablierung, GIS-kompatibel umsetzbar, langfristig realisierbar

4.3.2 Empfehlung

Es fällt auf, dass grundsätzlich alle Voraussetzungen für eine erweiterte Starkregenkarte in Hamburg geschaffen sind. Als besonders wertvoll und förderlich ist, neben einer GIS-basierten Bereitstellungsplattform und der Verwendung genauerer Radardaten, die Implementierung einer Melde-Plattform wie dem „Melde-Michel“ in der Starkregenkarte zu nen-

nen. Sowohl die Recherche zu den Starkregenereignissen aus Kapitel „4.1.1 Raumzeitliche Dokumentation der Starkregenereignisse“ als auch die starke Inanspruchnahme des „Melde-Michels“ zeigen, dass Bürgerinnen und Bürger in Ausnahme- bzw. Gefahrensituationen ihre Erfahrungen teilen. Diese Erfahrungen an einem Ort zusammengeführt, böten die Möglichkeit zukünftig ausgewiesene Gefahren- und Risikobereiche mittels in situ-Aufnahmen überprüfen zu können. Dies ist besonders wichtig, da sich die Gefahren- und Risikobereiche aus dem Zusammenspiel der übrigen Parameter, wie etwa topografische Gegebenheiten, Versiegelungsgrad einer Fläche, Aufnahmekapazitäten des Bodens oder Verdunstungspotenzial, ergeben. Selbiges Potenzial hätte die Auswertung der Feuerwehreinsatzdaten. Da diese jedoch kurzfristig schwierig zu beziehen sind und mit dem „Melde-Michel“ bereits eine Basis zur Registrierung von Schadensmeldungen vorhanden ist, sollte dieser Aspekt, nicht zuletzt wegen der Förderung der wechselseitigen Risikokommunikation zwischen Bürgern und Stadt, weiter ausgebaut werden.

5 Schlussfolgerung und Ausblick

In diesem Kapitel werden die Hypothesen geprüft. Anschließend erfolgt eine Beschreibung eines anderen Ansatzes zur Überprüfung der Aussagekraft von stationsbasierten Niederschlagsdaten in Verbindung mit in situ-Aufnahmen. Außerdem werden abschließend persönliche Empfehlungen und Einschätzungen für den zukünftigen Umgang mit Starkregen ausgesprochen.

5.1 Überprüfung der Hypothesen

5.1.1 Durch die Aufnahme weiterer Parameter in die bereits bestehenden Starkregenkarten können die Folgen durch Starkregen bundesweit verringert werden

Hydrologisch-hydraulischer Modellierungsansatz

Die realitätsnahe Berechnung des Fließverhaltens von Wasser erfordert die Berücksichtigung der Systemgrößen aus Niederschlag und Abfluss (vgl. Kapitel „3.3.1 Hydrologisch-hydraulische Modellierungsansätze“). Eine nicht ausreichende Entwässerungsleistung hat bei starken Regenfällen zur Folge, dass wieder austretendes und folglich oberflächlich abfließendes Wasser jährlich zu Schäden in Millionenhöhe führt (vgl. Kapitel „2.3 Definition Starkregen“). Aufgrund dieser Sachlage kann die Hypothese für den Parameter hydrologisch-hydraulischer Modellierungsansatz bestätigt werden.

Schadens- und Maßnahmendokumentation

Durch die Inanspruchnahme der beschriebenen Plattformen (vgl. Kapitel „3.3.2 Schadens- und Maßnahmendokumentation“ und „4.2 Prüfung der Voraussetzungen für die Umsetzbarkeit einer erweiterten Starkregenkarte für Hamburg“) durch Bürgerinnen und Bürger lässt sich eine Daseinsberechtigung und Sinnhaftigkeit ableiten. Ob diese jedoch im ausreichenden Maße zu einer Sensibilisierung der Nutzenden beiträgt, kann auf Grundlage der recherchierten Informationen nicht eindeutig gesagt werden. Das Zusammentragen von raumzeitlich erfasstem Bildmaterial trägt jedoch zu einer detaillierteren Auswertung einzelner Rege-

ereignisse bei und kann wertvolle Rückschlüsse auf Vulnerabilitäten einer Region liefern. Für den Parameter der Schadens- und Maßnahmendokumentation kann die Hypothese, hinsichtlich der Erkenntnisgewinnung über Schwachstellen in der Infrastruktur, bestätigt werden.

Feuerwehreinsätze

Das Heranziehen von Feuerwehreinsatzdaten zur Auswertung von Starkregenereignissen kann unter Umständen wertvolle Erkenntnisse liefern. Doch nicht immer muss ein räumlicher Zusammenhang zwischen dem Niederschlagsgebiet und den anschließenden Einsätzen der Feuerwehr oder der Technischen Hilfswerke bestehen (vgl. Abbildung 9 und 10). Reliefeigenschaften, andere topografische Gegebenheiten oder ein geringer Versiegelungsgrad führen häufig dazu, dass große Niederschlagsmengen an einen anderen Ort transportiert oder auch direkt vor Ort aufgenommen werden. So entstehen Einsätze unter Umständen an Orten mit nur geringen Niederschlagsmengen. Folglich kann die Hypothese bei alleiniger Verwendung des Parameters nicht bestätigt werden.

5.1.2 Mit den vorhandenen Niederschlagsdaten ist eine valide Aussage über die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Starkregens möglich

Radargestützte Niederschlagsdaten liefern genauere Erkenntnisse über gefallene Regenmengen als stationsbasierte Messungen. Dies bestätigen sowohl Veröffentlichungen von Lengfeld et al. und Seuffert, als auch die eigene Auswertung (vgl. Kapitel „3.3.4 Stations- und radargestützte Regendaten“). Es ist jedoch davon auszugehen, dass weder stations- noch radargestützte Niederschlagsdaten die Wiederkehrzeit jenseits von $T_n = 100$ a zuverlässig ermitteln können. Daher ist die Hypothese der Vorhersage einer validen Wiederkehrwahrscheinlichkeit nicht zu bestätigen.

5.1.3 Für Hamburg dient eine erweiterte Starkregenkarte hinsichtlich des Konflikts zwischen Erhalt von Grünflächen und Schaffung von Wohnraum als ein wichtiges Sicherheitsinstrument

Mit der Einführung von RISA wurde das Thema Starkregen bereits 2009 fachbehördlich in Hamburg etabliert. Der entwickelte Strukturplan Regenwasser 2030 sieht unter anderem die Veröffentlichung einer Starkregenkarte vor. Dabei soll sich diese Karte nicht auf die reine Darstellung von Niederschlagshöhen beschränken, sondern auch alle der in Kapitel „3.3 Erweiterungspotenzial“ beschriebenen Daten enthalten. Die Zunahme zukünftiger Überflutungen als Folge überlasteter Entwässerungsanlagen und das zeitgleiche Wachstum der Stadt macht besonders ein hydrologisch-hydraulisches Kartenwerk essenziell, zumindest für jene Gegenden der Stadt mit hohem Schutzgüteranteil (vgl. Kapitel „3.3.1 Hydrologisch-hydraulische Modellierungsansätze“). Die Hypothese kann aufgrund der klimatischen Relevanz des Themas und der demografischen Entwicklung in der Stadt als bestätigt betrachtet werden.

5.2 Sind weitere Verbesserungen und Untersuchungen empfehlenswert?

Die im Rahmen dieser Bachelorarbeit durchgeführten Berechnungen vergleichen lediglich die Niederschlagshöhen aus den Datensätzen KOSTRA-DWD-2010R und RADOLAN. Die erstellten Fließweg- und Senkenanalysen werden dabei separat betrachtet, um die relevanten Einzugsbereiche der betrachteten Überflutungen zu identifizieren und die Gesamtniederschlagsmenge zu errechnen. Durch diese separate Betrachtung und den Verzicht auf Zusammenführung der Daten werden zusätzliche rechnerische Ungenauigkeiten bei der Modellierung gering gehalten. Im Folgenden wird ein alternativer Versuch beschrieben, der genau diese Zusammenführung macht und Niederschlagshöhen aus dem KOSTRA-DWD-2010R-Datensatz mittels ArcGIS als Einstauhöhen darstellt. Folglich werden simulierte Einstauhöhen mit in situ-Aufnahmen verglichen.

Hofmann et al. (2019) prüfen mit einer Überlagerung von georeferenzierten Bildaufnahmen mehrerer Überflutungen im Aachener Stadtzentrum und einem hydrologisch-hydraulischen Modell die Übereinstimmungen zwischen simulierten und tatsächlichen Einstautiefen. Bei einem einstündigen Regenfall wurde mittels Radardaten die Niederschlagssumme 45-50 mm ermittelt. Nach KOSTRA-DWD-2010R entspricht das einem Ereignis der Jährlichkeit $T_n = 100$ a. Dieses Datenmaterial wurde, anders als bei den in Kapitel „4.1.4 Ermittlung der Einzugsgebiete, der Überflutungsflächen und Berechnung der Einstauhöhen“ genutzten Berechnungen, direkt in die hydrologisch-hydraulische Karte eingepflegt und anschließend wurden die entsprechenden Einstauhöhen simuliert. Die Auswertung des Bild- und Kartenmaterials ergab größtenteils eine Übereinstimmung der Angaben der Radaraufzeichnungen und der Wasserständen auf dem Bildmaterial. Lediglich bei einem von drei Orten der Auswertung ergaben sich Unstimmigkeiten. So simulierte die Karte hier ein höheres Überflutungsrisiko. Eine Begründung lag darin, dass die Kanalisation in dem hydrologisch-hydraulischen Modell nur pauschal berücksichtigt wurde und das Wasser durch Lichtschächte in Kellerräume abfluss (Hofmann et al., 2019b).

Mit der stetigen Validierung, beispielsweise mittels Feuerwehreinsatzdaten, können methodische Freiheitsgrade in Computermodellierungen immer weiter minimiert werden. Bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Berechnungen wäre eine Folgeuntersuchung mit der Verwendung von computermodellierten Einstautiefen interessant (vgl. Versuch Hofmann et al., 2019). Die zusätzliche Verwendung der Einsatzdaten der Hamburger Feuerwehr sowie Erfahrungswerte betroffener Bürgerinnen und Bürger könnten zu immer realistischeren Simulationen von Ereignissen beitragen.

Abschließend kann positiv festgehalten werden, dass es bundesweit bereits viele Ansätze zur Darstellung von Starkregenereignissen gibt. Doch unterscheiden sie sich meist stark, sowohl in der Darstellung als auch in der Qualität. Viele Kommunen, Städte und Landkreise veröffentlichen unpräzise Aussagen zu ihren Karten. Es werden Daten- und Modellierungsgrundlagen nicht erwähnt, was zu Beeinträchtigungen in der Verständlichkeit bei der Bevölkerung und auch den Einsatzkräften führt. Zur Verbesserung dieser Situation sind beispielsweise bundesweite Fortbildungsangebote für die Betreiber der Karten denkbar. Auch wäre die Einführung eines Starkregenbeauftragten pro Karte sinnvoll. Nicht ohne Grund hat die Stadt Bochum begonnen, Starkregenexperten auszubilden, um die steigende Nachfrage bei den Bürgern fachgerecht bearbeiten zu können (Correctiv, 2020).

Die Erstellung einer bundesweit einheitlichen Starkregenkarte ist vorerst wohl nur in einer Form realisierbar, die auch Hamburg Wasser wählt. Das bedeutet, es wird lediglich der gegenwärtige Niederschlag in einer Starkregenhinweiskarte angezeigt. Hierfür bietet sich der Starkregenindex an, da er intuitiv verständlich ist. Eine zusätzliche Darstellung von Einstautiefen, auf Basis hydrologisch-hydraulischer Modellierungen, ist aufgrund der Größe des Bundesgebiets nicht möglich. Bei einer überregionalen Einigung auf eine einheitliche Vorgehensweise ist eine flächendeckende Modellierung aussagekräftiger Starkregenkarten dennoch zu erreichen, wenn statt einer überregionalen, viele lokale Karten veröffentlicht würden. Dies würde auch die Problematik der enormen benötigten Rechenleistung umgehen, da eine Umsetzung dezentral erfolgen würde.

Die Veröffentlichung eines aussagekräftigen Kartenwerks kann viele essenzielle Schutzgüter in hohem Maße wahren. Zwar ist der Datenschutz jedes Einzelnen ein hohes Gut, wobei die personenbezogenen Daten mittels unterschiedlicher Detailgrade der Karten durchaus geschützt werden können. Zudem stehen die zu schützenden Güter gerade in den Fällen Gesundheit, Umwelt und Kulturerbe in der Regel über den Datenschutzinteressen jedes Einzelnen. Die betreffenden Stellen sollten nun in Diskussion mit den jeweiligen Landesdatenschutzbeauftragten gehen, um eine Gewichtung zwischen den beiden Interessen zu definieren und Missbrauch zu verhindern. Als Vorbild bei dieser Problematik kann der Umgang mit Google Street View in dieser Frage dienen. Bei der Veröffentlichung ihrer Bilder können Bürgerinnen und Bürger Widerspruch einlegen, mit der Folge, dass ihr Grundstück, Haus oder Eigentum unkenntlich gemacht wird. Ähnlich könnte auch im Falle der Starkregenkarten eine Abwägung zwischen den Interessen erfolgen.

6 Literaturverzeichnis

- Abendblatt, 2011: Mühlenkamp unter Wasser, Chaos in der Innenstadt, [online]
<https://www.abendblatt.de/hamburg/article108018633/Muehlenkamp-unter-Wasser-Chaos-in-der-Innenstadt> [08.08.2020]
- Abendblatt, 2016: Straßen und Keller überflutet: Tornados am Mittwoch möglich, [online]
<https://www.abendblatt.de/nachrichten/article207681931/Strassen-und-Keller-ueberflutet-Tornados-am-Mittwoch-moeglich.html> [09.08.2020]
- Baumgartner, A., Liebscher, H.-J., 1996: Allgemeine Hydrologie - Quantitative Hydrologie, Aufl. 2, Berlin, Stuttgart: Gebrüder Borntraeger,
- Bayrisches Landesamt für Umwelt, 2018: Niederschlags erfassung, [online]
https://www.lfu.bayern.de/wasser/hydrometeorologische_parameter/niederschlags erfassung/index.htm# [7. Juni 2020]
- Becker, A., 2015: Starkregen und seine Auswirkungen, Naturgefahrenreport 2015, Berlin: Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V., S. 8-11
- Bergedorfer Zeitung, 2018: Starkregen: Lohbrügg es Untergang aufgearbeitet [online]
<https://www.bergedorfer-zeitung.de/bergedorf/article214705327/Starkregen-Lohbruegg es-Untergang-aufgearbeitet.html> [12.08.2020]
- Bergedorfer Zeitung, 2018a: So tobte des Unwetter über dem Osten der Stadt, [online]
<https://www.bergedorfer-zeitung.de/bergedorf/article214257753/So-tobte-das-Unwetter-ueber-dem-Osten-der-Stadt.html> [12.08.2020]
- Breitkopf, A., Statista, 2020: Durchschnittlicher monatlicher Niederschlag von Mai 2019 bis Mai 2020 (in Liter pro Quadratmeter), [online]
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/5573/umfrage/monatlicher-niederschlag-in-deutschland/>, [5. Juni 2020]
- Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, 2015: Die unterschätzten Risiken „Starkregen“ und „Sturzfluten“. Ein Handbuch für Bürger und Kommunen, Aufl. 1, Bonn: Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, S. 366
- Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, 2016: Starkregen und Hochwasser – Vorsorge, Selbstschutz und Selbsthilfe, Pressemitteilung; [online]
https://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/BBK/DE/2016/PM_Starkregen-Hochwasser.html [9. Juni 2020]
- Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, 2019: Bevölkerungsschutz. Krisenmanagementübungen, Aufl. 3, Bonn: Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, S. 37 ff.
- Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, o.J.: Gesetz über den Deutschen Wetterdienst [online] <https://www.gesetze-im-internet.de/dwdg/> [23.08.2020]
- Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, o.J.a: Wasserhaushaltsgesetz § 37 Wasserabfluss

Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen, 2020: Umweltrisiken, DGNB System – Kriterienkatalog Quartiere, S. 254

Deutscher Städtetag, Deutscher Landkreistag, Deutscher Städte- und Gemeindebund, Verband Kommunaler Unternehmen e.V., 2017: Starkregen und Sturzfluten. Globalen Auswirkungen lokal begegnen. Positionspapier, [online]
https://www.dstgb.de/dstgb/Homepage/Publikationen/Positionspapiere/LAWA-Strategie%20zu%20Starkregen%20-%20Kommunale%20Position/170524%20Positionierung_DST_DStGB_DLT_VKU%20Starkregen_final.pdf [8. Juni 2020]

Deutscher Wetterdienst, 2017a: Messinstrumente der Meteorologie. Wetterradar in Deutschland, Auflg. 4, Offenbach am Main: Deutscher Wetterdienst

Deutscher Wetterdienst, 2017b: Starkregen, [online]
<https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/begriffe/S/Starkregen.html> [8. Juni 2020]

Deutscher Wetterdienst, 2018: Analysen radarbasierter stündlicher (RW) und täglicher (SF) Niederschlagshöhen, [online] <https://www.dwd.de/DE/leistungen/radolan/radolan.html> [31.07.2020]

Deutscher Wetterdienst, 2018: RADOLAN Kurzbeschreibung, [online]
https://www.dwd.de/DE/leistungen/radolan/radarniederschlagsprodukte/radolankurzbeschreibung_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=6 [31.07.2020]

Deutscher Wetterdienst, o.J.: Aufgaben des DWD, [online]
https://www.dwd.de/DE/derdwd/aufgaben/aufgaben_node.html [30.07.2020]

Deutscher Wetterdienst, o.J.: KOSTRA-DWD, [online]
https://www.dwd.de/DE/leistungen/kostra_dwd_rasterwerte/kostra_dwd_rasterwerte.html [30.07.2020]

Deutscher Wetterdienst, o.J.: Niederschlag, [online]
<https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=101812&lv3=101914> [5. Juni 2020]

Deutscher Wetterdienst, o.J.: Qualitätssicherung von Wetterradardaten, [online]
https://www.dwd.de/DE/forschung/wettervorhersage/met_fachverfahren/wetterradarverfahren/qualitaetssicherung_wetterradardaten.html [11.08.2020]

Deutscher Wetterdienst, o.J.: Wetterlexikon. Überschwemmung, [online]
<https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=102828&lv3=102846> [26.08.2020]

Deutscher Wetterdienst, o.J.: Radarniederschlag, [online]
<https://www.dwd.de/DE/leistungen/radarniederschlag/radarniederschlag.html> [7. Juni 2020]

DWA, 2012: Arbeitsblatt DWA-A 531: Starkregen in Abhängigkeit von Wiederkehrzeit und Dauer, Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.

Dyck, S., Peschke, G., 1995: Grundlagen der Hydrologie, Aufl. 3, Berlin: Verlag für Bauwesen
Fabig, I., 2007: Die Niederschlags- und Starkregenentwicklung der letzten 100 Jahre im Mitteldeutschen Trockengebiet als Indikatoren möglicher Klimaänderungen, Halle: Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, S. 7

Fabig, I., 2007: Die Niederschlags- und Starkregenentwicklung der letzten 100 Jahre im Mitteldeutschen Trockengebiet als Indikatoren möglicher Klimaänderungen, Halle: Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, S. 8

Feuerwehr Hamburg, 2019: Jahresbericht 2019 [online]
<https://www.hamburg.de/contentblob/14125070/5bc0a496bee5bde5126e7c090ca64347/data/jahresbericht-2019.pdf> [12.08.2020]

Freie und Hansestadt Hamburg, 2014: Überschwemmungsgebiete in Hamburg, Berichte des Landesbetriebes Straßen, Brücken und Gewässer, Nr. 15/2014, Hamburg: Freie und Hansestadt Hamburg, Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer, S. 2 f.

Freie und Hansestadt Hamburg, 2020: Information der Öffentlichkeit gemäß § 79 WHG über die Umsetzung der Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie für den deutschen Teil der Flussgebietseinheit Elbe [online]
<https://www.hamburg.de/contentblob/13535832/49ff87c5193544555c671b8748125c5a/data/d-hh-begleittext-gefahrenrisikokarten-jan2020.pdf> [23.07.2020]

Freie und Hansestadt Hamburg, 2020: Information der Öffentlichkeit gemäß § 79 WHG über die Umsetzung der Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie für den deutschen Teil der Flussgebietseinheit Elbe, [online]
<https://www.hamburg.de/contentblob/13535832/49ff87c5193544555c671b8748125c5a/data/d-hh-begleittext-gefahrenrisikokarten-jan2020.pdf> [12.08.2020]

Freie und Hansestadt Hamburg, 2020: Melde-Michel – Meldungen im öffentlichen Raum - Übersichtskarte, [online] <https://www.hamburg.de/uebersichtskarte/> [12.08.2020]

Geomer GmbH, Einzugsgebiet Glems, Kommunen Blaubeuren, Wadern, 2020: Starkregengefahrenkarten [online] <https://www.starkregengefahr.de/baden-wuerttemberg/glems/> [10.07.2020]

Gerz, J., Krummel, H., Schmiddy, M., Below, M., 2019: Frühwarnsystem für Starkregen - induzierte Überschwemmungen bei kleinen Fließgewässern, Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, Magazin Bevölkerungsschutz - Krisenmanagementübungen, 3. Auflage, Seite 35-39

Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V., 2017: Die Jahresbilanz 2016. Zwei zerstörerische Starkregen, in: Naturgefahrenreport 2017, Berlin: Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V., S. 30.

Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V., 2019: Die Sachschäden 2018, in: Naturgefahrenreport 2019, Berlin: Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V., S. 37.

Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V., 2019: Von 2002 bis 2017: Deutschlandweit 6,7 Milliarden Euro Starkregenschäden, [online] <https://www.gdv.de/de/themen/news/von-2002-bis-2017--deutschlandweit-6-7-milliarden-euro-starkregen-schaeden—52762> [10. Juni 2020]

Google Trends, Suchbegriff Starkregen, [online] <https://trends.google.de/trends/explore?date=all&geo=DE&q=starkregen> [8. Juni 2020]

Hamburg Wasser, 2020: Starkregenindex Hamburg, [online] <https://sri.hamburgwasser.de> [12.08.2020]

Hamburg Wasser, 2020: Starkregenkarte für Hamburg [online] <https://www.hamburgwasser.de/privatkunden/themen/starkregen/> [16. Juni 2020]

Hochschule Bremen, 2017: Praxisleitfaden, Ermittlung von Überflutungsgefahren mit vereinfachten und detaillierten hydrodynamischen Modellen, Bremen: Lehrgebiet Industrie- und Siedlungswirtschaft in Metropolregionen, S. 41 ff.

Hofmann J., Schüttrumpf H., 2019: Geodatenbasierte Dokumentationsverfahren für Starkniederschlagsereignisse und weiterführende Untersuchungen zur detaillierten Gefährdungsanalyse, Wasser und Abfall, Ausg. 9/2019, Berlin, Heidelberg: Springer Professionals, S. 38 ff.

Hofmann J., Schüttrumpf H., 2019b: Ein holistischer Modellansatz für ein multifunktionales Starkregenrisiko- Informationssystem, Wasserwirtschaft, Ausg. 4/2019, Berlin, Heidelberg: Springer Professionals, S. 38 ff.

Kutschker, T., 2019: Flächenlagen nach Starkregenereignissen – Die Feuerwehr an der Belastungsgrenze, Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, Magazin Bevölkerungsschutz – Klimawandel und Bevölkerungsschutz, 2. Aufl., Seite 6-12, S. 6 ff.

Landkreis Lörrach, 2020: Starkregengefahrenkarte [online] https://gis.loerrach-landkreis.de/buergergis/synserver?project=Buerger_Umwelt&client=flex&user=internet [14. Juni 2020]

LAWA, 2018: LAWA-Strategie für ein effektives Starkregenrisikomanagement, Erfurt: Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, S. 1ff.

LAWA, 2019: Arbeitspapier „Dokumentation von Starkregenereignissen“, Rheinland- Pfalz: Bund/Länder_Arbeitsgemeinschaft Wasser S. 1 ff.

Lengfeld, K., Kirstetter, P-E., Fowler, H., Yu, J., Becker, A., Flamig, Z., Gourley, J., 2020: Use of radar data for characterizing extreme precipitation at fine scales and short durations, Journal

LGV, 2017: Digitales Geländemodell Hamburgs, Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft

Löffler, H., 2012: Meteorologische Bodenmesstechnik, Auflg. 3, Offenbach am Main: Deutscher Wetterdienst, S. 95

- Malberg, H., 1985: Meteorologie und Klimatologie. Eine Einführung, Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, S. 156 - 157
- Maniak, U., 2016: Hydrologie und Wasserwirtschaft. Eine Einführung für Ingenieure, Auflg. 7, Berlin, Heidelberg: Springer Viewwing, S. 21
- Maniak, U., 2016: Hydrologie und Wasserwirtschaft. Eine Einführung für Ingenieure, Auflg. 7, Berlin, Heidelberg: Springer Viewwing, S. 23
- Mischutin, A., Hübener, H., Hoy, A., 2018: Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Klimawandel in Hessen – Schwerpunktthema
- Mudersbach C., Netzel F., Krüger M., Pfister, A., 2017: Starkregenindizes: Geeignete Instrumente für die Risikokommunikation in Zeiten des hydrologischen Wandels?, Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung Heft 38.17
- RISA, 2015: RISA Strukturplan Regenwasser 2030, Hamburg: Hamburger Stadtentwässerung, Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft
- RISA, 2020: Hamburg schützt sich vor Starkregen, Hamburg: Hamburg Wasser, Freie und Hansestadt Hamburg, S. 2 ff.
- Scheid, C., 2018: GIS-basierte Starkregen-Risikoanalyse unter besonderer Berücksichtigung von Datenerfordernissen und methodischer Aussagefähigkeit, Wasser Infrastruktur Ressourcen, Band 4/2018, Technische Universität Kaiserslautern, S. 87 ff.
- Schmitt, Theo G. (2014): Starkregenindex zur Kommunikation von Überflutungsursachen und Risiken. Hennef: Korrespondenz Abwasser, Abfall 61:8
- Schmitt, T., Netzel F., Krüger M., Fuchs L., Becker, M., Mudersbach C., Hoppe, H., Lakes, I., 2018: Einheitliches Konzept zur Bewertung von Starkregenereignissen mittels Starkregenindex, Korrespondenz Abwasser, Abfall, 2018 (65) Nr. 2, S. 113 ff.
- Seuffert, O., 2002: Der Reinfeld mit dem „Rainfall“ - Das Ende einer wissenschaftlichen Weltanschauung?, Bensheim: Geoöko, 23. S. 1-60
- Seuffert, O., 2004: Wo die Meteorologie mit Ihrem „Latein“ am Ende ist. Versuch einer geökodynamisch fundierten Bewertung der jüngsten Klima-, insbesondere Niederschlagsentwicklung in Mitteleuropa unter Bezug auf die 2002er Katastrophenregen und -fluten im Elbe-Einzugsgebiet und die Klimaprognose für Sachsen, Bensheim: Geoöko Auflg. 25, S. 1-40
- Spiegel, 2016: Baden fahren, [online] <https://www.spiegel.de/panorama/unwetter-und-starkregen-in-hamburg-frankfurt-am-main-a-1097676.html> [09.08.2020]
- Stadt Emsdetten, 2019: Hochwasserschutz: Starkregenkarten für alle Grundstücke [online] <https://www.emsdetten.de/planen-bauen-umwelt-verkehr/umwelt-klimaschutz2/2019-01-18/hochwasserschutz-starkregenkarten-fuer-alle-grundstuecke.html> [15. Juni 2020]
- Stadt Gelsenkirchen, 2020: Lesehilfe Starkregengefahrenkarte [online] https://gdi.gelsenkirchen.de/karten/UN_Umwelt_Natur/Starkregengefahrenkarte/pdf/Lesehilfe_Starkregengefahrenkarte.pdf [17. Juni 2020]

Stadt Ludwigshafen, 2020: Auszug aus der Starkregengefahrenkarte [online]
<https://www.ludwigshafen.de/buergernah/buergerservice/dienstleistungen-a-z/detail/services-detail/auszug-aus-der-starkregengefahrenkarte> [15. Juni 2020]

Stadt Ochsenhausen, 2018: Starkregengefahrenkarten [online]
<https://www.ochsenhausen.de/wirtschaft-umwelt/unwetterschutz/starkregengefahrenkarten> [19. Juni 2020]

Stadt Oldenburg, 2019: Starkregengefahrenkarte Stadt Oldenburg [online]
<https://gis4ol.oldenburg.de/Starkregengefahrenkarte/index.html> [17. Juni 2020].

Stadt Trier, 2020: Gefährdete Gebiete bei Starkregen [online] <https://www.trier.de/leben-in-trier/hochwasser-starkregen/starkregen/bin-ich-gefaehrdet/> [15. Juni 2020].

Stadtentwässerungsbetriebe Köln, 2017: FAQ Starkregengefahrenkarte [online]
<https://www.steb-koeln.de/Redaktionell/ABLAGE/Downloads/Broschüren-Veröffentlichungen/Hochwasserveröffentlichungen/FAQ-Starkregengefahrenkarte-Mai-2017.pdf> [17. Juni 2020]

Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein, 2019: Bevölkerungswachstum setzt sich fort [online] <https://www.statistik-nord.de/zahlen-fakten/bevoelkerung/bevoelkerungsstand-und-entwicklung/dokumentenansicht/bevoelkerungsprognose-fuer-hamburg-61317> [23.07.2020]

Tagesschau, 2011: Wolkenbruchartige Regenfälle in Hamburg, [online]
<http://www.tagesschau.de/multimedia/video/sendungsbeitrag114124.html> [09.08.2020]

Umweltbundesamt, 2011: Hochwasser. Verstehen, Erkennen, Handeln!, Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, S. 8 ff.

Umweltbundesamt, 2019: Vorsorge gegen Starkregenereignisse und Maßnahmen zur wassersensiblen Stadtentwicklung - Analyse des Standes der Starkregenvorsorge in Deutschland und Ableitung zukünftigen Handlungsbedarfs. Abschlussbericht, Auflg. 55, Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, S. 37 ff.

Umweltbundesamt, 2019: Vorsorge gegen Starkregenereignisse und Maßnahmen zur wassersensiblen Stadtentwicklung - Analyse des Standes der Starkregenvorsorge in Deutschland und Ableitung zukünftigen Handlungsbedarfs. Abschlussbericht, Auflg. 55, Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, S. 59 ff.

Umweltministerkonferenz, 2018: Ergebnisprotokoll, Bremen: Umweltministerkonferenz, S. 44 ff.

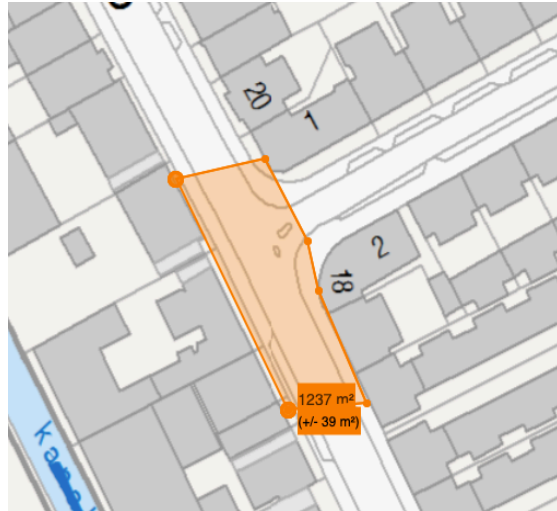
V Anhang

1 Liste aller recherchierten Starkregenarten in Deutschland

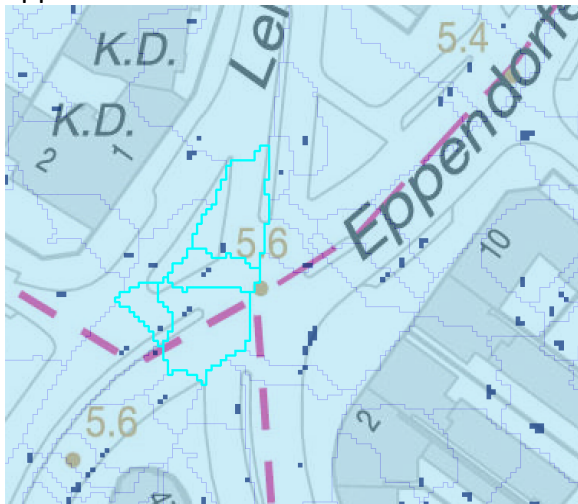
Stadt/Kreis	Art	Starkregenszenarien	Datengrundlage	Modellierung
Bielerfeld	PDF-Format	100 T	KOSTRA-DWD-2010R	2D Oberflächenabfluss
Bonn	Interaktiv	50 T, 100T, extrem	DWD, k.w.A.	2D Oberflächenabfluss
Bremen	Interaktiv	30 T, 50 T, 100T	KOSTRA-DWD-2010R	2D Oberflächenabfluss
Dortmund	Interaktiv	100 T	k.A.	k.A.
Dresden	Interaktiv	10 T + Elbehochwasser	ITWH	hydrologisch-hydraulisch
Düsseldorf	PDF-Format	50 T	KOSTRA-DWD-2000	2D Oberflächenabfluss
Emscher-Lippe-Region	Interaktiv	90 L / m2	k.A.	k.A.
Emsdetten	Auf Anfrage	-	-	-
Erbach Donau	PDF-Format	selten, außergewöhnlich, extrem	KOSTRA-DWD-2010	2D Oberflächenabfluss
Erkath	Interaktiv	SRI 7, SRI 9, SRI 12	KOSTRA-DWD-2010	hydrologisch-hydraulisch
Essen	Interaktiv	100 T	k.A.	2D Oberflächenabfluss
Gelsenkirchen	Interaktiv	100 T	KOSTRA-DWD-2010	2D Oberflächenabfluss
Gemeinde Eitorf	PDF-Format	k.A.	k.A.	k.A.
Gemeinde Riegelesberg	PDF-Format	20 T, 100 T	k.A.	2D Oberflächenabfluss
Glens-Einzugsgebiet	Interaktiv	außergewöhnlich, extrem	k.A.	k.A.
Herne	Interaktiv	30 T, 100 T, >> 1000 T	k.A.	2D Oberflächenabfluss
Köln	Interaktiv	30 T, 50 T, 100 T	k.A.	2D Oberflächenabfluss
Korschenbroich	Interaktiv	100 T, 500 T	k.A.	2D Oberflächenabfluss
Kreis Herford	Interaktiv	k.A.	k.A.	2D Oberflächenabfluss
Leichlingen	Interaktiv	100 T	k.A.	hydrologisch-hydraulisch
Leverkusen	Interaktiv	50 T, 100T und >100T	KOSTRA-DWD-2010R	k.A.
Landkreis Lörrach	PDF-Format	>10 T, >50 T und >200 T	k.A.	2D Oberflächenabfluss
Lübbeck	PDF-Format	k.A.	k.A.	2D Oberflächenabfluss (teilw. Hyd-hyd. Mod.)
Ludwigshafen	Auf Anfrage	-	-	-
Münster	PDF-Format	90 L / m2	k.A.	k.A.
Ochsenhausen	PDF-Format	selten, außergewöhnlich, extrem	k.A.	k.A.
Oedheim	PDF-Format	selten, außergewöhnlich, extrem	k.A.	2D Oberflächenabfluss
Oldenburg (Oldb.)	Interaktiv	intensiv, außergewöhnlich, extrem	KOSTRA-DWD-2000	2D Oberflächenabfluss
Recklinghausen	PDF-Format	65 L/m2/h	k.A.	DGM, k.w.A.
Remscheid	Interaktiv	50 T	"KOSTRA-DWD"	hydrologisch-hydraulisch
Schwäbisch Gmünd	PDF-Format	selten, außergewöhnlich, extrem	"KOSTRA-DWD"	k.A.
Schwerte	Interaktiv	100 T = SRI 7	k.A.	Schummernung, k.w.A.
Solingen	Interaktiv	Aktuelle Regenmenge in mm/h	"Radardaten"	DGM, k.w.A.
Trier	Auf Anfrage	-	-	-
Ulm	PDF-Format	außergewöhnlich	k.A.	k.A.
Wachberg	Interaktiv	100 T	k.A.	k.A.
Wadern	Interaktiv	selten, außergewöhnlich, extrem	k.A.	k.A.
Worms	Interaktiv	50 T	"KOSTRA-DWD"	k.A.
Wuppertal	Interaktiv	SRI 6, SRI 7, SRI 10, SRI 11	k.A.	hydrologisch-hydraulisch

2 Einzugsgebiete und überflutete Flächen

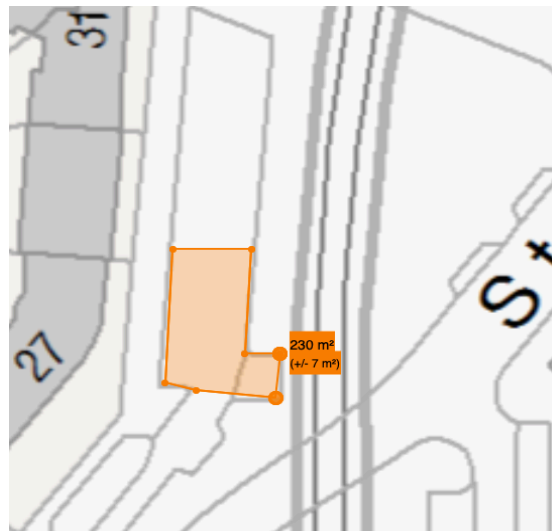
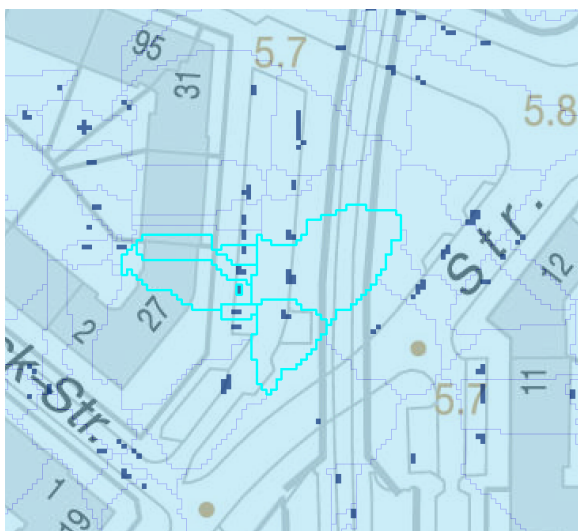
Mühlenkamp 2011



Eppendorf 2016



Moorkamp 2016



Heckkatenweg 2018



Am Beckerkamp 2018

