



Hydrologie: Verbindung der Umweltsphären und -disziplinen.
eingereichte Beiträge zum geplanten Tag der Hydrologie 2020 in Potsdam

Axel Bronstert, Björn Felix Guse, Theresa Blume, Fred Fokko Hattermann, Sascha Oswald,
Annegret Thieken



HEFT **42.20**

Hydrologie: Verbindung der Umweltsphären und -disziplinen.
eingereichte Beiträge zum geplanten Tag der Hydrologie 2020 in Potsdam

Axel Bronstert, Björn Felix Guse, Theresa Blume, Fred Fokko Hattermann, Sascha Oswald,
Annegret Thieken

Veranstalter:

- ≈ Institut für Umweltwissenschaften und Geographie der Universität Potsdam
- ≈ UP Transfer GmbH Potsdam
- ≈ Deutsche Hydrologische Gesellschaft (DHG)
- ≈ Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften in der DWA (FgHW), Hennef
- ≈ Hauptausschuss Hydrologie und Wasserbewirtschaftung der DWA

Mitveranstalter:

- ≈ Helmholtz-Zentrum Potsdam Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ)
- ≈ Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)
- ≈ Landesamt für Umwelt Brandenburg



Axel Bronstert, Björn Felix Guse, Theresa Blume, Fred Fokko Hattermann, Sascha Oswald, Annegret Thieken (Herausgeber)

Hydrologie: Verbindung der Umweltsphären und -disziplinen.

Eingereichte Beiträge zum geplanten Tag der Hydrologie 2020 in Potsdam

Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung; Heft 42.20

ISBN: 978-3-88721-958-1

DOI: 10.14617/for.hydrol.wasbew.42.20

Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften, 2020

Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung

Herausgeber:

Fachgemeinschaft Hydrologische
Wissenschaften in der DWA
Geschäftsstelle
Theodor-Heuss-Allee 17
D – 53773 Hennef
Tel.: 02242/872 – 161
Fax: 02242/872 – 184
info@fghw.de
www.fghw.de

Schriftleitung:

Dr. Christian Reinhardt-Imjela

Umschlaggestaltung:

Dorit Steinberger, Ohlstadt

Umschlagbearbeitung:

Christiane Krieg (DWA)

Univ.-Prof. Dr. Markus Disse
Fachgemeinschaft Hydrologische
Wissenschaften in der DWA

Dr.-Ing. habil. Uwe Müller
Hauptausschuss Hydrologie und
Wasserbewirtschaftung der DWA

Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz. <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

Die wissenschaftliche Richtigkeit der Texte, Abbildungen und Tabellen unterliegt nicht der Verantwortung der Herausgeber.



Vorwort

Die Hydrologie hat sich in den vergangenen Jahrzehnten als eine zentrale Disziplin in den Umweltwissenschaften und im Umwelt- und Bauingenieurwesen entwickelt und etabliert. Sie thematisiert und quantifiziert die Prozesse, Zustände und Bedingungen des terrestrischen Wasserkreislaufs in fast allen Raum- und Zeitskalen und legt damit auch die Grundlagen zur Beurteilung von Wasserinhaltsstoffen, zu nachgeschalteten Stoffkreisläufen und zu wasserbezogenen ökologischen Fragen. Neben dieser weithin anerkannten Relevanz ist die Hydrologie aber auch zu einem zentralen inhaltlichen und methodischen Bindeglied für die Analyse von komplexen Umweltsystemen bezüglich der Wechselwirkungen mit anderen Umweltwissenschaften und der Gesellschaft geworden.

Dies war das übergreifende Thema des Tags Hydrologie 2020 an der Universität Potsdam. Die eingereichten Beiträge lassen sich in folgende Schwerpunkte untergliedern:

- I. Wechselwirkungen zwischen der Hydrosphäre und anderen Teilen des Erdsystems, etwa Atmosphäre, Geosphäre oder Biosphäre;
- II. Wechselwirkungen zwischen hydrologischen Extremen, dem Auftreten entsprechender Risiken für den Menschen und mit deren Umgang;
- III. Beispiele aus der Praxis für disziplinübergreifende Ansätze und Lösungen;
- IV. spezielle interdisziplinäre methodische Innovationen

Der Tag der Hydrologie 2020 wurde vom Lehrstuhl Hydrologie und Klimatologie am Institut für Umweltwissenschaften und Geographie der Universität Potsdam und der UP Transfer GmbH organisiert. Weiterhin fungierten folgende Institutionen als Mitveranstalter: Deutsche Hydrologische Gesellschaft (DHG), Fachgemeinschaft hydrologische Wissenschaften (FghW), Hauptausschuss Wasserwirtschaft der DWA, Sektion Hydrologie des Helmholtz-Zentrums Potsdam – Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ), Forschungsgruppe Hydrologische Extreme des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung (PIK) und das Landesamt für Umwelt Brandenburg.

Aufgrund der Corona-Pandemie musste die Tagung leider kurz vor deren Durchführung abgesagt werden. Da sowohl das Programm bereits vollständig aufgestellt war und zudem viele Autoren ihre wissenschaftlichen Beiträge den Veranstaltern bereits in der Endfassung bereitgestellt hatten, haben wir uns entschlossen, diese Beiträge in dem hier nun vorliegenden Band zu veröffentlichen. Es ist damit gelungen, einen ca. 100-seitigen Konferenzband mit sehr interessanten und wissenschaftlich fundierten Beiträgen der Fachöffentlichkeit zur Verfügung zu stellen. Wir bedanken uns bei allen Veranstaltern des Tags der Hydrologie 2020, allen potentiellen Betragenden und Ausstellern. Besondere Dank gilt Dr. Christian Reinhardt-Imjela und Martin Schüttig für die Zusammenstellung dieses Tagungsbandes.

Wir freuen uns sehr auf den Tag der Hydrologie 2021, wiederum in Potsdam, an dem wir uns dann hoffentlich persönlich gegenseitig begrüßen werden können.

Axel Bronstert und Björn Guse

Heft 42 2020 Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung

Hydrologie: Verbindung der Umweltsphären und –disziplinen

Reicht das Wasser für Berlin?	5
<i>Ruth Bittner, Gesche Grützmaker, Jens Burgschweiger</i>	
Zunehmende Intensitäten von kurzen Starkniederschlägen als Folge der regionalen Erwärmung	17
<i>Gerd Bürger, Axel Bronstert</i>	
Generierung von Niederschlagsintensitäten aus Kfz-Sensordaten durch Kalibrierung an Niederschlagsradaren und Pluviometern	29
<i>Mark Braun, Magnus Hoffmann, Sajjad Tabatabaei, Adrian Treis, Dimitri Falk, Etienne Costa-Patry</i>	
Multifunktionale Flächennutzung für den Hochwasserschutz am Beispiel des Zoos in Gelsenkirchen	37
<i>Georg Johann, Bettina Krüsken</i>	
Sulfat in der Spree: Gefährdung, Bewirtschaftung, Prognosen.....	45
<i>Michael Kaltofen, Jens Burgschweiger, Benjamin Creutzfeldt, Jörg Walther, Katja Eulitz, Björn Fischer, Oliver von Hoegen, Julia Krause</i>	
„Natürlich.Schierke“ - hydro- und ingenieurgeologische Erkundung, hydrologische Modellierung und Validierung durch Monitoring im Zuge der Planung eines Skigebietes	51
<i>Markus Bauer, Beate Klöcking, Gerd Knab, Peter Neumann, Gesine Karches</i>	
Der Zusammenhang zwischen Pedotransferfunktion und Modellverhalten	55
<i>Markus Casper, Sonja Teschemacher, Hadis Mohajerani, Oliver Gronz</i>	
Die simultane Bewirtschaftung von Wasserbereitstellung und -bedarf einer Talsperre unter Bedingungen extremer Wasserknappheit.....	59
<i>Alexandra Dietz, Jens Grundmann, Niels Schütze</i>	
Langzeitmessungen der Niederschlagsinterzeption in einem Fichtenbestand im Tharandter Wald	63
<i>Sandra Grunicke, Max Plorin, Ronald Queck, Christian Bernhofer</i>	
Auswirkungen der systematischen Unterschätzung von Niederschlagsextremwerten der DX- Radardaten.....	67
<i>Markus Jessen, Thomas Einfalt</i>	
How and why to walk the bridge between the social and the natural Human-water perspectives from above and below the ground	77
<i>Karen Lebek, Theresa Frommen, Tobias Krüger</i>	
Gemeinsamkeiten und Unterschiede fluvialer Schwebstoffe im Gewässerverlauf eines kleinen, urban geprägten Einzugsgebiets	81
<i>Berenike Meyer, Sabine Keßler, Reinhard Bierl, Tobias Schütz</i>	

Niedrigwasser in Thüringen – Zeitreihenanalyse von Abflüssen an Fließgewässerpegeln	85
<i>Nico Trauth, Ralf Haupt</i>	
Anthropogenic impacts on water quality of the Pallikaranai catchment, Chennai, India	89
<i>Daniel Rosado, Lukas Loose, Indumathi M. Nambi, Xiuming Sun, Nicola Fohrer</i>	
Weichenstellung im Untergrund – vom Baseflow-Index zum Grundwasser-Neubildungs-Index?.....	93
<i>Andreas Steinbrich, Hannes Leistert, Michael Stölzle, Markus Weiler</i>	

Reicht das Wasser für Berlin?

Ruth Bittner, Gesche Grützmacher, Jens Burgschweiger

Zusammenfassung

In dem Konzept zur Festigung der Resilienz der Trinkwasserversorgung in Berlin sollten die Auswirkungen von klimatischen Veränderungen untersucht, Handlungsbedarf identifiziert und notwendige Maßnahmen festgelegt werden. Die Auswertung der Klimaszenarien ergab, dass sich die Region bis 2050 auf generell ansteigende Temperaturen sowie häufigere Dürreperioden und Starkregeneignisse einstellen muss. Kritisch für die Wasserversorgung sind dabei vor allem häufigere Dürreperioden mit einem heftigen Anstieg des Wasserbedarfs sowie die aufgrund der steigenden Verdunstung verringerten nutzbaren Wasserressourcen (Grund- und Oberflächenwasser). Dies wirkt sich einerseits auf die Deckung des Wasserbedarfs aus (Handlungsfeld Menge), andererseits jedoch auch auf die Mikrobiologie, den urbanen Wasserkreislauf (Staufstufen) und erhöht den Konkurrenzdruck gegenüber anderen Nutzern (Schifffahrt, Landwirtschaft, Umlandversorger, Industrie).

1. Anlass und Zielstellung

Das System der Berliner Trinkwasserversorgung (Abbildung 1) mit einer Förderung von Grundwasser, gespeist aus Uferfiltration, Grundwasseranreicherung und landseitigem Zufluss hat sich im Extremjahr 2018 und dem darauffolgenden, ebenfalls trockenen Jahr 2019 grundsätzlich bewährt und dazu geführt, dass es zu keinen Einschränkungen in der Wasserversorgung kam. Die ungewöhnliche Höhe und Dauer der Sommerspitzenförderung 2018 gab jedoch Anlass dazu, diesen Sonderzustand zu analysieren, ggf. vorhandene Engpässe zu identifizieren und Handlungsbedarf abzuleiten. Entsprechend unseres Auftrages zur Daseinsvorsorge wird das Ziel verfolgt, auch in extremen Trockenphasen bzw. Dürreperioden die Trinkwasserversorgung der Stadt Berlin sicher aufrechtzuerhalten.

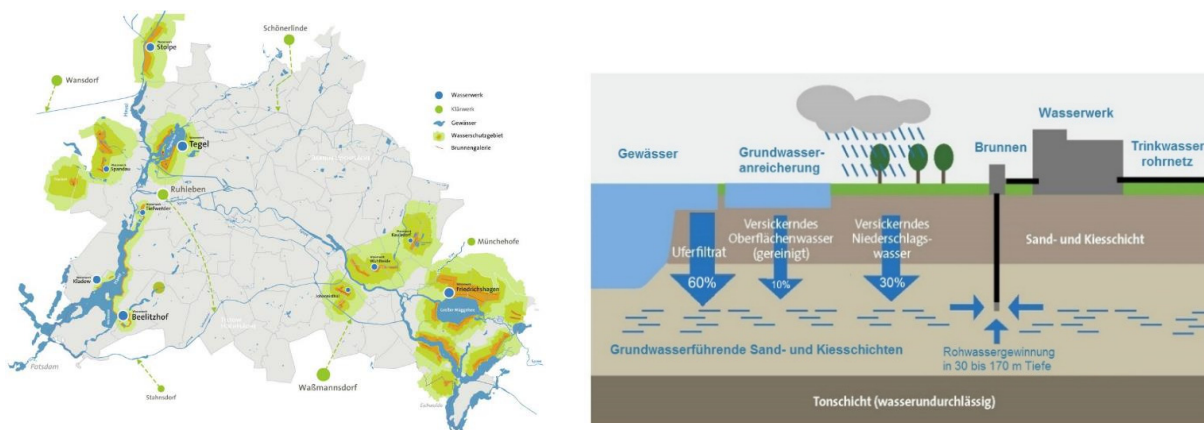


Abbildung 1: Wasserwerke, Brunnengalerien mit Schutzgebieten und Klärwerke (links) sowie die Trinkwassergewinnung (rechts) der Berliner Wasserbetriebe (eigene Darstellungen)

Aufgrund der wachsenden Stadt und der erwarteten klimatischen Veränderungen können Situationen wie im Jahr 2018 zukünftig häufiger auftreten und in ihrem Ausmaß sogar übertroffen werden. Ziel ist es, zu überprüfen, ob die bisher angestoßenen Maßnahmen vor dem Hintergrund von Klimawandel und wachsender Stadt ausreichend sind, um die Trinkwasserversorgung zukünftig sicherzustellen und gegebenenfalls zusätzliche Maßnahmen zu identifizieren. Resilienz im Sinne der Wasserversorgung beschreibt die Fähigkeit des Wasserversorgungssystems, seine Dienstleistungen auch unter Stress und in turbulenten Umgebungen – trotz

massiver äußerer Störungen und interner Ausfälle – aufrecht zu erhalten (abgewandelt nach Gleich et al. 2010). Hier erfolgt die Untersuchung der Resilienz der Trinkwasserversorgung Berlins gegenüber langanhaltenden Trockenphasen und steigenden Temperaturen.

Erste Untersuchungen zur Resilienz des Berliner Wasserversorgungssystems wurden im Forschungsprojekt „ResiWater“ (Piller, Sedehizade, 2016, <https://www.resiwater.eu/project/>) durchgeführt. Bei diesem Projekt lag der Schwerpunkt der Betrachtungen auf dem Rohrnetz. Dort wurde die Erhöhung der Sicherheit und Stabilität des Wasserverteilungssystems mit Hilfe einer optimalen Überwachung des Systems, mit Präventionsmaßnahmen für die Minimierung der Risiken sowie durch die Bereitstellung von Ressourcen für eine angemessene Reaktion (z.B. Rohrbruchbeseitigung, Desinfektion) untersucht.

Was in „ResiWater“ nicht untersucht wurde, waren die Bereiche Rohwassergewinnung und Trinkwasseraufbereitung. Beide Bereiche stehen jedoch im Fokus, wenn es um die Resilienz der Trinkwasserversorgung gegenüber klimatischen Sondersituationen geht – unabhängig von kurzzeitigen Ausfällen bzw. Havarien. Daher liegt der Schwerpunkt der Untersuchungen zur Festigung der Resilienz der Trinkwasserversorgung Berlins auf diesen Bereichen. Das Ziel ist es dabei, – entsprechend des gesetzlichen Auftrages der Daseinsvorsorge – einen Ausfall des Systems grundsätzlich zu vermeiden.

Die Auswertung von Klimaszenarien ergab, dass sich die Region bis 2050 auf generell ansteigende Temperaturen (mind. 1,5°C im Jahresdurchschnitt) sowie häufigere Dürreperioden und Starkregenereignisse einstellen muss (Reusswig et al., 2016). Kritisch für die Wasserversorgung sind dabei vor allem häufigere Dürreperioden sowie die aufgrund der steigenden Temperaturen – und der damit verbundenen höheren Verdunstung – verringerten nutzbaren Wasserressourcen (Grund- und Oberflächenwasser). Dies wirkt sich einerseits auf die Deckung des Wasserbedarfs aus (Handlungsfeld Menge), andererseits jedoch auch auf die Handlungsfelder Mikrobiologie, urbaner Wasserkreislauf / Staustufen sowie den Konkurrenzdruck gegenüber anderen Nutzern (Schifffahrt, Landwirtschaft, Umlandversorger).

2. Bevölkerungsentwicklung und zukünftiger Trinkwasserbedarf

Der Prognose des Roh- und Reinwasserbedarfs liegen zunächst die Annahmen für die zukünftigen Einwohner Berlins zugrunde. Die Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin veröffentlichte im Jahr 2016 eine Prognose (SenStadtUm 2016), nach der die Bevölkerung bis 2030 kontinuierlich ansteigt. Die drei dokumentierten Varianten unterscheiden sich in den Zuwachsraten. Mit 3,748 Mio. Einwohnern am 31.12.2018 bewegen sich die Zahlen in der Realität auf der oberen Variante (Abbildung 2). Vor dem Hintergrund des vorsorgenden Charakters der Trinkwasserversorgung wird für das Jahr 2030 mit einer Gesamtbevölkerungszahl von 4,0 Mio. Einwohnern gerechnet.

Für die Wasserbedarfsprognose bis 2050 soll hier mit einem Szenario kalkuliert werden, bei dem das Wachstum zwischen 2030 und 2050 in einem gleichbleibenden, moderaten Maße – der Zuwachs beträgt 10.000 Einwohnern pro Jahr – anhält. In diesem Fall ist im Jahr 2050 mit 4,2 Mio. Einwohnern zu rechnen. Je weiter der Prognosehorizont in die Zukunft zeigt, desto

größer ist der Unsicherheitsbereich. Dieser wird – wie in Abbildung 2 dargestellt – im Jahr 2050 auf eine Spanne von 3,8 bis 4,7 Mio. Einwohner eingeschätzt.

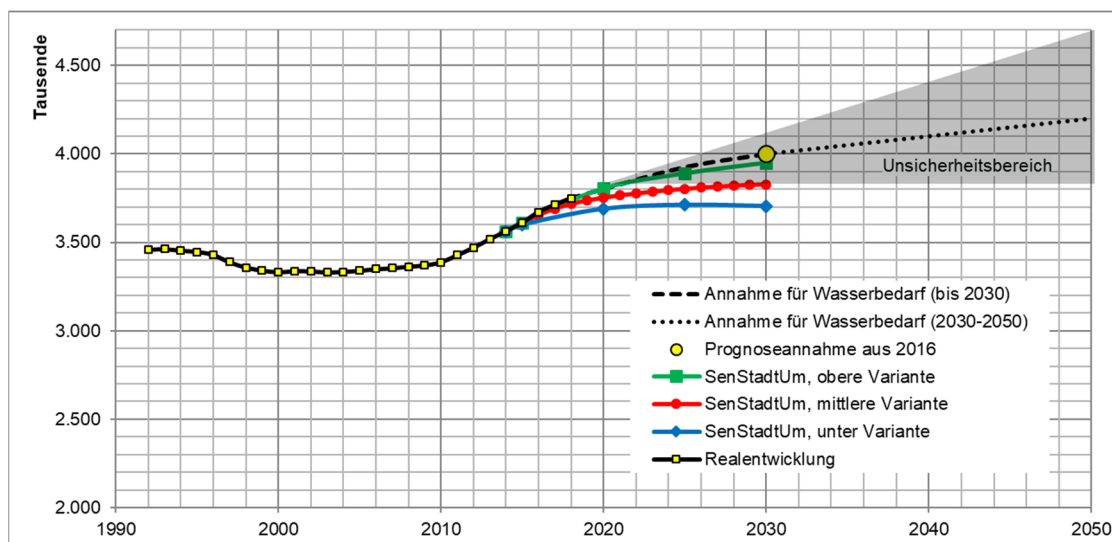


Abbildung 2: Bevölkerungsentwicklung bis 2030 nach SenUVK (2016). Gestrichelte Linie: Annahme eines Szenarios mit anhaltendem Wachstum (Einwohnerzuwachs 37500 EW/a bis 2030, danach 10.000 EW/a).

Aus den Bevölkerungszahlen Berlins wurden unter Berücksichtigung des spezifischen Pro-Kopf-Verbrauchs sowie des Bedarfs für Gewerbe, Industrie und Sonstige die prognostizierten Netzabgaben und Rohwasserfördermengen bis 2050 ermittelt (Tabelle 1). Es werden die Prognoseergebnisse für das Basiszenario und für das Szenario „Trockenjahr“ gezeigt. Der deutliche Anstieg des Wasserbedarfs im Jahr 2018 um 18,9 Mio. m³/a hat gezeigt, dass für Trockenjahre ein erhöhter Wasserbedarf zu berücksichtigen ist. Die Einwohnerzahl erhöhte sich von 2017 zu 2018 um 1 %. Der Wasserbedarf stieg aber um 9 %. Der größere Teil dieses Anstiegs resultierte demnach aus den deutlich anderen Witterungsbedingungen im Jahr 2018 gegenüber dem Jahr 2017. Die erhöhte Sommerförderung wirkt sich in einem Anstieg des spezifischen Wasserbedarfs der Haushalte sowie in den erhöhten Bedarfen für Industrie und Gewerbe, Sonstige und Umland aus (Tabelle 1).

Tabelle 1: Wichtige Kennzahlen für die Resilienz der Wasserversorgung 2030 und 2050 (jeweils als Basis-Szenario und als Szenario Trockenjahr).

	Basis-Szenario 2030	Szenario Trockenjahr 2030	Basis-Szenario 2050	Szenario Trockenjahr 2050
Einwohnerzahl (Mio.)	4,0	4,0	4,2	4,2
Wasserbedarf Haushalte (Mio m ³ /a)	160	169	168	181
Wasserbedarf Industrie / Gewerbe / Sonstige (Mio m ³ /a)	59,4	62,7	64,5	68
Wasserbedarf Gesamt (Mio m³/a)	219	232	232	249
Rohwasserbedarf (Mio m³/a)	239	252	253	270
Spitzenbedarf Q1 (m³/d)	1.050.847	1.077.054	1.014.925	1.049.437

Unter Berücksichtigung der Bevölkerungsentwicklung und des Mehrbedarfs für Trockenjahre ergibt sich für das Jahr 2030 eine Rohwasserförderung von 252 Mio. m³/a und im Maximal-Szenario für 2050 von 270 Mio. m³/a.

3. Entwicklung des Wasserdargebotes

3.1 Landseitiges Grundwasser und Uferfiltrat

Das Berliner System der Uferfiltration ist gegenüber reiner Grundwasser- oder Oberflächenwassergewinnung vergleichsweise robust in Bezug auf variable klimatische Verhältnisse ausgelegt, da es sowohl aus dem landseitigen Grundwasser als auch aus dem Oberflächenwasser gespeist wird. Bei saisonalen Defiziten in einem Bereich kann der andere (vorübergehend) verstärkt beansprucht werden und gleicht somit das Defizit aus (Sprenger et al. 2009). Kommt es jedoch zu einer langfristigen Veränderung im Wasserhaushalt, wie sich dies für die Grundwasserneubildung abzeichnet, so müssen die erneuerbaren Trinkwasserressourcen (also das nutzbare Grundwasserdargebot) neu bewertet werden.

Um eine erste Einschätzung durchführen zu können, wurden Abschätzungen im regionalen Maßstab durch Marx et al. (2018) zu Hilfe genommen. Diese am Umweltforschungszentrum Leipzig mittels mesoskaliger hydrologischer Modellierung (mHM) durchgeführten Modellrechnungen ergeben, dass die Abflüsse der Oberflächengewässer bei Niedrigwasser (10%-Perzentil) in der kontinentalen Klimazone Europas, zu der der Osten Deutschland gehört, bei 3°C Temperaturanstieg um rd. 20% bis zum Ende des Jahrhunderts zurückgehen werden. Da die Niedrigwasserabflüsse als Maßstab für die Größenordnung der Grundwasserneubildung angesehen werden können, wird im Sinne des vorsorgenden Charakters der Wasserversorgung hier in einem „worst-case“-Szenario ein etwas erhöhter Rückgang von 10% (2030) bzw. 20% (2050) im Grundwasserdargebot angesetzt. Diese Annahme bestätigen Sklorz et al. (2014), die für die Periode 2051 - 2060 einen Rückgang der Grundwasserneubildung im Berliner Raum zwischen 17 und 27 % prognostizieren.

Das Grundwasserdargebot an den aktuell aktiven neun Förderstandorten der Berliner Wasserbetriebe beträgt nach den Grundlagenermittlungen zum Wasserversorgungskonzept (WVK2040) aus dem Jahr 2009 rund 358 Mio m³/a. Demnach beträgt die nicht förderbare Jahresmenge in Summe, unmittelbar resultierend aus verringerter Grundwasserneubildung bis 2030 -3,8 Mio m³/a (nur an Standorten mit hohem landseitigen Grundwasseranteil) und bis 2050 -7,6 Mio m³/a. Mittelbar ergeben sich über erhöhte Einschränkungen aufgrund qualitativer und naturschutzrechtlicher Probleme zusätzliche Fehlmengen.

Durch die Stauhaltung der Berliner Gewässer und die Einleitungen der Klärwerke der Berliner Wasserbetriebe in diese Staustufen resultiert eine weitgehende Konstanz der Gewässerspiegel auch in Trockenphasen. In der Staustufe der Oberhavel war die Bilanz der Wasserzuflüsse und –entnahmen in besonderen Trockenphasen (2003, 2018, 2019) nicht vollständig ausgeglichen und es ergaben sich Absenkungen der Gewässerspiegellage um einige Dezimeter. Erfahrungen aus den Trockenjahren 2003 und 2018 zeigen, dass auch ein Absinken des Oberflächengewässerspiegels um bis zu 90 cm über mehrere Wochen keine relevante Auswirkung auf die verfügbare Grundwassermenge hat. Die geringere Infiltrationsmenge wird durch den

Zustrom landseitigen Grundwassers ausgeglichen – sofern die Brunnen in gutem Zustand sind und eine ausreichend Überdeckung aufweisen. Berücksichtigt werden muss jedoch auch der erhöhte Anteil von gereinigtem Abwasser in der Trinkwasserressource und der damit einhergehende zeitweise Anstieg von Spurenstoffgehalten.

3.2 Entwicklung der Wasserqualität

Die Wasserressourcen in Berlin und Umland sind durch verschiedene Qualitätsbeeinflussungen bereits heute im Hinblick auf die Gewinnung zu Trinkwasserzwecken eingeschränkt.

Bei den Ursachen handelt es sich einerseits um Altlasten im Anstrom der Brunnengalerien, die derzeit saniert werden, sich in der Erkundung befinden oder bei denen eine Sanierung sich (nach Auskunft der Altlastenbehörde) nicht lohnt. Dadurch ergeben sich aktuelle Einschränkungen von -25 Mio m³/a in der Jahresmenge. Die zukünftige Entwicklung der Einschränkungen durch altlastenbürtige Schadstoffe ist schlecht prognostizierbar. Sie könnten sich auch aufgrund verringerter Grundwasserneubildung nach eigenen Einschätzungen bis 2030 auf -30,2 Mio.m³/a erhöhen.

Für Brunnen, die geogen bedingt erhöhte Gehalte an Salzen oder Huminstoffen aufweisen, ist besondere Vorsicht geboten, da die Prozesse des Salzwasseraufstiegs, die häufig mit erhöhten Huminstoffgehalten einhergehen, kurzfristig schlecht zu beherrschen sind. Aktuell belaufen sich die Einschränkungen auf -14 Mio. m³/a und könnten sich im ungünstigen Fall auf -16,8 Mio m³/a erhöhen.

Weitere mögliche qualitative Einschränkungen ergeben sich aus dem bergbaubedingten Vorkommen von Sulfat im Oberflächenwasser der Spree. Derzeit liegen die Sulfatgehalte in der Spree – auch dank der politischen Anstrengungen der vergangenen Jahre – wieder in einem weniger kritischen Bereich und es existieren noch keinerlei Einschränkungen für die Förderung des am meisten betroffenen Wasserwerks Friedrichshagen. Bei einem Anstieg der Sulfatgehalte im Oberflächenwasser ergäben sich Einschränkungen im Bereich von -12 Mio m³/a (Burgschweiger, 2019).

Durch die veränderte Ableitung des Klärwerksablaufes, der Einrichtung einer Pulveraktivkohle-(PAK-) Dosierung an der Oberflächenwasseraufbereitungsanlage (OWA) Tegel sowie der Einrichtung einer Ozonanlage am Klärwerk Schönerlinde können zurzeit Einschränkungen am Wasserwerk Tegel aufgrund von abwasserbürtigen Spurenstoffen vermieden werden. Im „worst-case“-Szenario wird damit gerechnet, dass durch intensivere und häufigere Niedrigwasserphasen die Verdünnung der Klärwerksabläufe reduziert wird und bei steigendem Arzneimittelkonsum (demographische Entwicklung) die Effekte der Spurenstoffentfernung zum Teil wieder ausgeglichen werden. Für 2030 ergeben sich grob abgeschätzt -6 Mio m³/a Einschränkungen, die sich bis 2050 auf rd. -13 Mio m³/a erhöhen könnten.

3.3 Anforderungen Naturschutz

Im Umfeld der Wasserwerksgalerien existiert eine Vielzahl geschützter Biotope, die zum Teil durch die Grundwasserförderung beeinflusst werden (vor allem Moore). Am Standort Friedrichshagen werden daher bereits jetzt auf der Basis einer freiwilligen Selbstbeschränkung Galerien gedrosselt in der Größenordnung von -14,6 Mio m³/a. Um diese Einschränkungen auch an anderen Standorten zukünftig zu verringern, werden derzeit Anstrengungen unternommen,

Schäden an den Mooren zu vermeiden (Pilotvorhaben zur Moorberegnung am Barssee im Grunewald). Im günstigsten Fall könnten dann die naturschutzfachlichen Einschränkungen weitgehend vermieden werden. Für ein „worst-case“ Szenario muss jedoch angenommen werden, dass die Einschränkungen vor dem Hintergrund verringerter Grundwasserneubildungsraten noch auf -22,3 Mio m³/a erhöht werden.

Tabelle 2: Aktuelle und zukünftige Einschränkungen der Grundwasserressource für das „worst-case“ Szenario 2030 in Mio.m³/a

Mio m ³ /a	Basis-Szenario	„worst-case“-Szenario
Natürliches Grundwasserdargebot	358	358
Verringerte Grundwasserneubildung	0	-3,8
Einschränkungen Qualität*	-39	-65
Einschränkungen Naturschutz	-14,6	-22,3
Sonstige Einschränkungen**	-44,6	-44,6
Nutzbares Grundwasserdargebot	260	222

*Altlasten, Sulfat, Spurenstoffe, Salz- und Huminstoffe

** aktuell nicht betriebene Brunnengalerien, Beschränkung Bewilligung- oder Antragsmengen, 9%-Regel Stolpe, Korrektur ggü. WVK 2040.

Die meisten Einschränkungen im „worst-case“-Szenario ergeben sich zukünftig aus qualitativen Problemen, wie beispielsweise Sulfat (-12 Mio m³/a), Spurenstoffen (-6 Mio m³/a), Altlasten (-30 Mio m³/a) oder Versalzung / Huminstoffen (-16,8 Mio m³/a) an verschiedenen Wasserwerksstandorten. Sonstige Einschränkungen ergeben sich aus stillgelegten Brunnen und Galerien. Der klimatisch bedingte Rückgang der Grundwasserneubildung von -3,8 Mio m³/a über alle Wasserwerke erscheint demgegenüber relativ gering, auch wenn er die Situation zusätzlich verschärft

Mit den oben genannten Einschränkungen sinkt in einem noch realistischen, schlechtesten Szenario die aktuell förderbare Menge von rd. 260 Mio m³/a auf 222 Mio m³/a (s. Tabelle 2). Gegenüber der theoretisch zur Verfügung stehenden förderbaren Rohwassermenge in 2030 („worst-case“-Szenario) von 222 Mio m³/a steht ein Trinkwasserbedarf im extremen Trockenjahr 2030 von rd. 252 Mio m³/a (vgl. Tabelle 1). Die theoretische Versorgungslücke beträgt ohne Berücksichtigung von bereits angestoßenen Gegenmaßnahmen somit 30 Mio m³/a. Auch sind notwendige Reservekapazitäten für Baumaßnahmen oder Havarien noch nicht berücksichtigt.

4 Handlungsfeld Menge

Höhere Temperaturen und häufigere, lange anhaltende Trockenperioden führen zu einem ansteigenden Wasserbedarf bei gleichzeitiger Verringerung der natürlichen Ressourcen. Es steigen damit die Herausforderungen zur Schaffung ausreichender Trinkwasserkapazitäten zur Deckung des weiter anwachsenden Bedarfs.

Eine Vielzahl von bereits angestoßenen Maßnahmen haben das Ziel, die förderbare Jahres- oder Tagesmenge zu erhöhen, oder die Robustheit des Systems zu optimieren bzw. die notwendigen Reserven zu verringern. Im Folgenden werden diese beschrieben und ihre Auswir-

kungen soweit wie möglich quantifiziert, um beurteilen zu können, mit welcher Wahrscheinlichkeit sie erfolgreich sein werden und ob sie ausreichend sind, die Klimaresilienz der Wasserversorgung zu gewährleisten.

4.1 Erhöhung der förderbaren Jahresmenge durch Dargebotsausschöpfung an existierenden Standorten

Im Grunewald ist derzeit eine Pilotanlage zur Moorberegnung im Bau, die sicherstellen soll, dass es auch bei steigenden Fördermengen nicht zu einer Verschlechterung des ökologischen Zustandes kommt. Somit werden Einschränkungen bei den Jahresfördermengen aus naturschutzfachlichen Gründen vermieden.

Eine wichtige Maßnahme zur Vermeidung von qualitativen Einschränkungen an den Spree-Wasserwerken (v.a. Friedrichshagen) ist die Fortsetzung der politischen Bemühungen um die Einhaltung des Sulfat-Zielwertes in der Spree. Die Berliner Wasserbetriebe können durch transparente Kommunikation und Forschungsarbeiten die Behörden am Erkenntnisgewinn teilhaben lassen und somit die Basis für eine gute fachliche Diskussion zu den Prioritäten liefern. Ziel muss sein, die Aufbereitung sulfathaltigen Wassers im Wasserwerk zu verhindern. Die bisher durchgeführten Untersuchungen zur Elimination von Sulfat aus dem Trinkwasser im Forschungsprojekt SULEMAN (https://www.tuhh.de/www/forschung_laufende-projekte/suleman.html) zeigten bereits, dass diese Verfahren mit einem großen Anstieg des Energieverbrauchs, einer starken Veränderung der natürlichen Wasserzusammensetzung und erheblichen zusätzlichen Wasserverlusten verbunden sind.

Standorte, an denen die Fördermengen durch Huminstoffe eingeschränkt werden (Stolpe, Kladow, Beelitzhof), ließen sich durch eine optimierte Aufbereitung im Hinblick auf die Jahresfördermengen ggf. um 2 Mio m³/a erhöhen. Hierzu werden derzeit Versuche im Großmaßstab durchgeführt, die unter anderem zu einer Anpassung der Auslegung der Filterflächen für die Erneuerung der Trinkwasseraufbereitungsanlage am Wasserwerk Beelitzhof geführt haben.

Für den Standort Stolpe existiert aus der Vergangenheit die Beschränkung der Fördermengen auf 9% der Jahresförderung Berlins. Eine Aufhebung könnte innerhalb der geltenden wasserrechtlichen Genehmigung bis zu 5 Mio m³/a Rohwasserförderung zusätzlich ermöglichen.

Schließlich können durch die Installation einer Spurenstoffentfernung auf den Kläranlagen zukünftige Einschränkungen vermieden werden, die durch erhöhte Konzentrationen von anthropogenen abwasserbürtigen Spurenstoffen entstehen. Hier ließen sich zukünftige Einschränkungen von bis zu 13 Mio m³/a vermeiden.

Als wichtigste Maßnahme für die mittelfristige Erhöhung der Robustheit des gesamten Wasserversorgungssystems gegenüber langanhaltenden Dürreperioden und Gewährleistung der Werkskapazitäten ist die Realisierung von 30 Brunnenerneuerungen sowie von 120 – 130 Brunnenregenerierungen pro Jahr. An den Standorten Kladow und Wuhlheide sind derzeit im Rahmen von Verdichtungsmaßnahmen an existierenden Galerien auch zusätzliche Brunnen geplant. Diese werden vor allem dazu dienen, die jeweilige Werkskapazität am sommerlichen Spitzentag zu sichern.

Zu den Brunnenerneuerungen und -regenerierungen kommen Maßnahmen zur Optimierung der Pumpenauslegung hinzu. Dafür rüsten die BWB derzeit die Brunnenpumpen auf energieeffiziente frequenzgesteuerte Permanentmagnet (PM)- Motorpumpen um. Diese Maßnahme

haben sich aus Überlegungen zur Energieeinsparung bei der Rohwassergewinnung im Forschungsprojekt ENERWAG (<https://www.tuhh.de/www/forschung/beendete-projekte/enerwag.html>) abgeleitet und bieten zusätzlich die Möglichkeit, die Fördermengen im Bedarfsfall zu erhöhen oder zu verändern. Während einer sommerlichen Spitzenförderung kann durch die Erhöhung der Motorfrequenz der Brunnenpumpen die geförderte Rohwassermenge erhöht werden.

4.2 Erhöhung der förderbaren Jahresmenge durch Erschließung zusätzlichen Dargebot

An ehemaligen Wasserwerksstandorten können Wiederinbetriebnahmen von Wasserwerken zusätzliches Dargebot erschließen. Am Standort Jungfernheide wird zurzeit die Wiederinbetriebnahme mit einer Machbarkeitsstudie geprüft. Dort liegt ein GW-Dargebot von ca. 12 Mio. m³/a (ohne GWA) vor. Unter Berücksichtigung des Qualitätszustandes der Ressourcen und von Nutzungskonflikten wird dieser Standort zurzeit bewertet. Für die Wiederinbetriebnahme sind der Neubau des Wasserwerkes und das Bohren der Brunnen erforderlich. Die Anlagen für eine Grundwasseranreicherung (GWA) sind noch vorhanden, müssen jedoch wieder erüchtigt werden.

Die weitere Entwicklung des Standortes Johannisthal soll so geplant werden, dass einerseits die aktuell erforderliche Funktion als Zwischenpumpwerk erhalten bleibt und andererseits Ausbauschritte hin zu einem Wasserwerksstandort unternommen werden können. Für die Aufbereitung zu Trinkwasser mit naturnahen Verfahren könnte aktuell ein nutzbares Dargebot von ca. 3 Mio. m³/a genutzt werden. Dies jedoch nur unter der Voraussetzung, dass die bestehenden Brunnen zur Sicherung der Altlastenfahnen weiter betrieben und damit die Altlastenabwehr und Altlastenbehandlung fortgesetzt werden. Bis zur Stilllegung des WW Johannisthal wurden hier bis zu 12,8 Mio.m³/a gefördert.

Unter Berücksichtigung der Erfolgs- oder Umsetzungswahrscheinlichkeit ergibt sich in der Summe für bereits angestoßene Maßnahmen zur Erhöhung der Fördermengen wie z. B. die Gespräche zur Einhaltung des Sulfat-Zielwertes, die optimierte Aufbereitung hinsichtlich Huminstoffe, die Abschaffung der Förderbeschränkung im Wasserwerk Stolpe und die Ozonung am Klärwerk Schönerlinde eine zusätzliche Jahresmenge von 32 Mio.m³/a. Die benötigte Jahresmenge von 252 Mio m³/a im Szenario Trockenjahr 2030 könnte mit diesen zur Umsetzung vorgeschlagenen Maßnahmen erreicht werden – es bliebe auch ein geringer Spielraum von 2 Mio m³/a zur Abdeckung des Risikos.

Die Wiederinbetriebnahme der Wasserwerke Jungfernheide und Johannisthal würde die Jahresmenge um weitere 15 Mio m³/a erhöhen und damit zur Abdeckung von Risiken und Ausfällen durch Baumaßnahmen beitragen. Diese würden zusätzlich zur Erhöhung von Jahres- und Tagesmengen die Redundanzen erhöhen und zu einer Vergleichmäßigung der Förderung beitragen. Die Kapazitätsengpässe am Spitzentag wären dann ebenfalls ausgeglichen.

5 Handlungsfeld Mikrobiologie

Höhere Temperaturen erhöhen das Risiko mikrobieller Verunreinigungen im Wasserversorgungssystem. Zur Begrenzung der ansonsten zusätzlich erforderlichen Redundanzen sollen

an allen Wasserwerksstandorten UV-Anlagen zur Desinfektion des Trinkwassers nach Bedarf ohne Bildung von Desinfektionsnebenprodukten installiert werden.

Sie sollen nach der Feststellung mikrobieller Verunreinigungen oder wenn solche nicht mit ausreichender Sicherheit ausgeschlossen werden können in Betrieb genommen werden. Die ersten beiden Anlagen wurden bereits in den Zwischenpumpwerken Lindenberg und Lichtenberg installiert.

6 Handlungsfeld urbaner Wasserkreislauf/Stauhaltung

Die Oberflächengewässer Berlins, die Flüsse Spree und Havel, sowie verschiedene Seen wie Müggelsee, Tegeler See und Wannsee stellen für die Trinkwasserversorgung aufgrund des hohen Anteil von Uferfiltrat und angereichertem Grundwasser (GWA) in den Brunnengalerien (ca. 70% der Jahresförderung) die wesentliche Rohwasserressource dar. Gleichzeitig sind in ihnen aufgrund der Einleitungen gereinigten Abwassers deutliche Anzeichen eines urbanen Einflusses zu beobachten, wie z.B. abwasserbürtige Spurenstoffe (Arzneimittel o.Ä.). Dabei sind die Wasserwerke aufgrund unterschiedlicher Uferfiltrat- und GWA-Anteile und aufgrund ihrer Lage um Zu- oder Abstrom von Kläranlagen unterschiedlich stark betroffen (Abbildung 3).

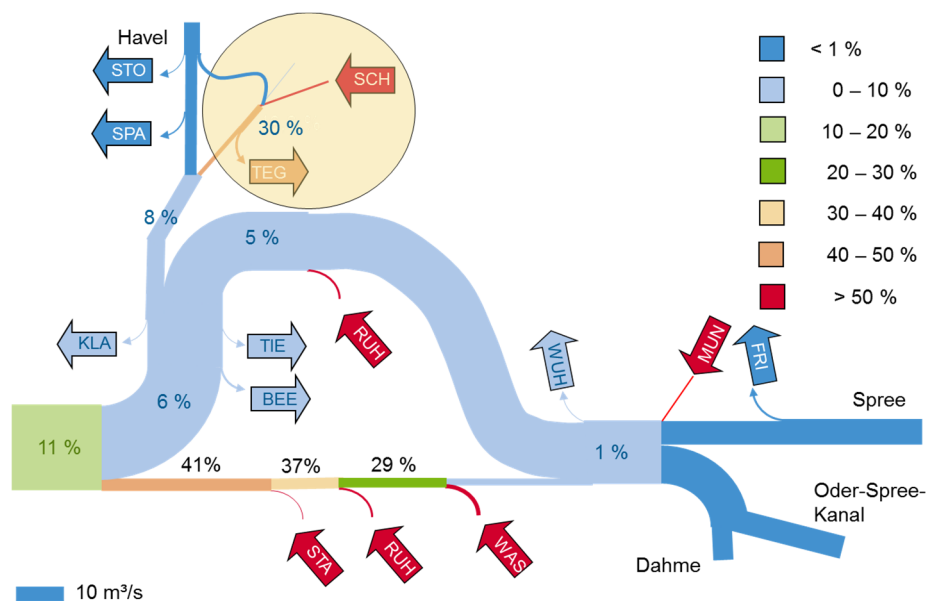


Abbildung 3: Klarwasseranteile aus Berliner Kläranlagen im Oberflächengewässer (Jahresdurchschnitt 2009-2014) (Franzke & Feddern, 2018)

Im Jahr 2014 wurden im besonders stark urban beeinflussten Wasserwerk Tegel erstmals relevante Konzentrationen von Medikamentenrückständen im Reinwasser gefunden. Dies war der Anlass zur Entwicklung einer unternehmensweiten „Strategie zum Umgang mit abwasserbürtigen anthropogenen Spurenstoffen“, verabschiedet im Jahr 2016 (BWB 2016). Aufbauend auf der Spurenstoffstrategie werden folgende Maßnahmen die Resilienz der Trinkwasserversorgung gegenüber klimatischen Veränderungen erhöhen:

- Fortsetzung der Bemühungen, durch Öffentlichkeits- und Gremienarbeit sowie politische Einflussnahme den Eintrag von persistenten, mobilen und toxikologisch relevanten anthropogenen Spurenstoffen weitgehend zu minimieren.
- Unterstützung der Senatsverwaltung im Rahmen der Erarbeitung des Masterplans Wasser die Zuflussmengen nach Berlin auch in Trockenphasen durch eine länderübergreifende Flussgebietsbewirtschaftung von Spree und Havel zu sichern,
- Umsetzung der Entkopplung von Trinkwassergewinnung und Abwasserableitung z.B. durch Verstärkung der Wasserförderung im Bereich Stolpe und Nutzung des Klärwerks Stahnsdorf für die Erweiterungskapazitäten.
- Sukzessive Ausrüstung der Kläranlagen mit Aufbereitungsstufen zur Spurenstoffentfernung.

7 Handlungsfeld Konkurrenzdruck

Der steigende Wasserbedarf und die Verringerung der natürlichen Ressourcen verstärken die Konkurrenz mit anderen Versorgern, der Landwirtschaft, der Schifffahrt, der Stadtentwicklung (inkl. Industrieansiedlungen) und den Naturschutzanforderungen. Der Flächenbedarf für Wasserschutzzone führt zu Nutzungskonflikten mit Stadtentwicklung, Industrie und Naturschutz. Mit Maßnahmen für einen sorgsameren Umgang mit Trinkwasser (z.B. Sprengverbot in Dürreperioden) könnte das Verbrauchsniveau in sommerlichen Höchstförderphasen von Ost- und Westberlin wieder auf ein mittleres Niveau gesenkt werden und somit politisch ein Signal gesetzt werden, um den Konkurrenzdruck zu verringern.

Literatur

- Burgschweiger (2019): Sulfatbelastung der Spree – Szenarioanalyse für das Wasserwerk Friedrichshagen. – interner Bericht der Berliner Wasserbetriebe.
- Bäcker, D. (2019): Spielt unser Klima verrückt? https://www.uni-vechta.de/fileadmin/user_upload/Transformationswissenschaft/190228_Klimatagung/01_Baecker_Vechta.pdf
- DVGW (2019): Konsequenzen aus dem Trockenjahr 2018 für eine sichere Wasserversorgung im Klimawandel. - Ergebnisse des DVGW-Diskurses am 23.1.2019 in Bonn (internes Memo)
- Franzke, U. & Feddern J. (2018): Die Berliner Spurenstoffstrategie und ihre Umsetzung. - wwt Modernisierungsreport 2018 / 2019: S. 37 - 40.
- Gleich, A. von; Gößling-Reisemann, S.; Stührmann, S.; Woizescke, P. (2010a): Resilienz als Leitkonzept – Vulnerabilität als analytische Kategorie. In: Fichter, K.; Gleich, A. von; Pfriem, R.; Siebenhüner, B. (Hg.) (2010): Theoretische Grundlagen für erfolgreiche Klimaanpassungsstrategien. nordwest2050-Berichte 1, Bremen/Oldenburg.
- Marx, A., Kumar, R., Thober, S., Rakovec, O., Wanders, N., Zink, M., Wood, E. F., Pan, M., Sheffield, J., and Samaniego, L.: Climate change alters low flows in Europe under global warming of 1.5, 2, and 3 °C, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22, 1017–1032, <https://doi.org/10.5194/hess-22-1017-2018>, 2018.
- Piller, O., Sedehizade, F. (2016): INNOVATIVE SECURE SENSOR NETWORKS AND MODEL-BASED ASSESSMENT TOOLS FOR INCREASED RESILIENCE OF WATER

- INFRASTRUCTURES. Project reference for France & for Germany: ANR-14-PICS-0003 & BMBF-13N13690.
- Reusswig, F.; Becker, C.; Lass, W.; Haag, L.; Hirschfeld, J.; Knorr, A.; Lüdeke, M.K.B.; Neuhaus, A.; Pankoke, C.; Rupp, J., Walther, C.; Walz, S.; Weyer, G.; Wiesemann, E. (2016): Anpassung an die Folgen des Klimawandels in Berlin (AFOK). Klimaschutz Teilkonzept. Teil I: Hauptbericht; Teil II: Materialien. Potsdam, Berlin. Juli 2016.
- Samaniego, L., Thober, S., Kumar, R. et al. Anthropogenic warming exacerbates European soil moisture droughts. *Nature Clim Change* 8, 421–426 (2018) doi:10.1038/s41558-018-0138-5.
- Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt (SenStadtUm) - 2. (2016). Szenarien zur Entwicklung der Flüchtlingszahlen in Berlin 2015 - 2020. Berlin: http://www.stadtentwicklung.berlin.de/planen/bevoelkerungsprognose/download/2015-2030/SenStadt_Szenarien-Fluechtlinge.pdf.
- Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt. (SenStadtUm) (2016). Bevölkerungsprognose für Berlin und die Bezirke 2015-2030. Berlin: Ref. I A – Stadtentwicklungsplanung in Zusammenarbeit mit dem Amt für Statistik Berlin-Brandenburg.
- Sklorz, S., Monninkhoff, B. & Goedecke, M. (2014): Entwicklung der Grundwasserneubildung im Großraum Berlin für die Periode 2051 bis 2060 – Einfluss auf die Grundwasserstände des EZG WW Tegel. – In: Kaden, S., Dietrich, O. & Theobald, S. (Hrsg.): Wassermanagement im Klimawandel. 2014 oekom, München; 521 S.

Zunehmende Intensitäten von kurzen Starkniederschlägen als Folge der regionalen Erwärmung

Gerd Bürger, Axel Bronstert

Zusammenfassung

Extreme Niederschläge von kurzer Dauer (< 1 Stunde) rücken aufgrund des anthropogenen Klimawandels und der damit zu erwartenden Schäden durch Sturzfluten immer stärker in den Fokus. Unsere Studie liefert, basierend auf einer „mittleren“ Klimasimulation für das 21. Jahrhundert, für eine Reihe von Stationen der Emscher-Lippe-Region eine Projektion für extreme Niederschlagsintensitäten in sehr hoher zeitlicher Auflösung. Dazu wird ein gekoppeltes räumliches und zeitliches "Downscaling" angewendet, dessen entscheidende Neuerung die Berücksichtigung der Abhängigkeit der lokalen Regenintensität von der Lufttemperatur ist. Dieses Verfahren beinhaltet zwei Schritte: Zuerst werden großräumige Klimafelder in täglicher Auflösung durch Regression mit den Temperatur- und Niederschlagswerten der Stationen statistisch verbunden (räumliches Downscaling). Im zweiten Schritt werden dann diese Stationswerte mithilfe eines sog. multiplikativen stochastischen Kaskadenmodells (MC) auf eine zeitliche Auflösung von 10 Minuten disaggregiert (zeitliches Downscaling). Die neuartige, Temperatursensitive Variante „MC⁺“ berücksichtigt zusätzlich die Lufttemperatur als erklärende Variable für die Niederschlagsintensitäten. Dadurch wird der mit einer Erwärmung zu erwartende höhere atmosphärische Feuchtegehalt, welcher sich aus der Clausius-Clapeyron (CC) Beziehung ergibt, mit in das zeitliche Downscaling einbezogen. Zur Kalibrierung und Validierung dieses Verfahrens dienen 21 langjährige Beobachtungsreihen in 10-minütiger Auflösung aus der Emscher-Lippe Region.

Für die statistische Auswertung der extremen Kurzfrist-Niederschläge benutzen wir obere Quantile (99%), Überschreitungssummen (ÜS, $P>5\text{mm}$) und 3-Jahres Wiederkehrniveaus (WN) der 10-Minuten Dauerstufe. Nur durch die Hinzunahme der Temperatur (MC⁺) wird die beobachtete Temperaturabhängigkeit der extremen Quantile ("CC scaling") gut wieder gegeben. Die Analysen langfristiger Trends der Überschreitungssummen und Wiederkehrniveaus zeigen zwar erhebliche Unsicherheiten, bewegen sich aber in einer Größenordnung von 30% Zunahme pro Jahrhundert. Bei Vergleich von Beobachtungsdaten und verschiedenen Gegenwartssimulationen der Modellkaskade zeigt das MC⁺-Verfahren konsistente Ergebnisse. Im Vergleich zu den Entwicklungen der letzten Jahrzehnte werden für die Zukunft ähnliche oder sogar noch stärkere Anstiege der extremen Intensitäten projiziert. Dies ist insofern bemerkenswert, als diese anscheinend hauptsächlich durch die örtliche Temperatur bestimmt werden, denn die projizierten Trends in Tageswerten sind für diese Region vernachlässigbar.

1. Einführung

Extreme Regenintensitäten in Zeitschritten von Stunden oder noch kürzer können eine erhebliche Gefährdung für unterschiedliche Systeme der natürlichen und anthropogen beeinflussten Umwelt darstellen, wie etwa Ackerflächen, aquatische Ökosysteme (Flüsse und Seen) oder die städtische Infrastruktur. In urbanen Gebieten führen überlastete Kanalisationssysteme zur Überflutung u.a. von Verkehrsflächen und Gewerbegebieten und damit zu ökologischen Gefahren, da sie im Notfall direkt in Flüsse oder Seen abgeleitet werden müssen (siehe ASCE 1992, Grüning & Pecher 2020). Bei Ackerland kann die angebaute Frucht bzw. die Ernte direkt durch die hohe kinetische Energie des Regens zerstört werden, und zudem kommt es dann oft zu einer starken Bodenerosion. Die materiellen Verluste können in der Größenordnung der

jährlichen Gesamternte liegen (Salles et al. 2000), die Erosion der humosen Oberböden reduziert die Fruchtbarkeit der betroffenen Flächen und führt zu erheblicher Eutrophierung in den Gewässerökosystemen, denen diese Sedimentfracht dann zuströmt (z.B. Wood et al. 2005). In hügeligen oder bergigen Einzugsgebieten kann sich innerhalb von wenigen Minuten viel Oberflächenwasser ansammeln und dadurch Sturzfluten bedingen. Diese bedingen oft die Mobilisierung und den Transport erheblicher Sediment- und Geschiebefrachten, u.a. die Entwurzelung und Verlagerung von Bäumen und/oder die Entstehung von Muren. Solche Ereignisse können katastrophale Auswirkungen haben, i.d.R. ohne die Möglichkeit einer frühzeitigen Warnung, und entsprechende menschliche und materielle Verluste verursachen (Bronstert et al. 2018).

Für die Analyse und Prognose von Sturzfluten ist die adäquate Raumskala die untere Meso-Skala von etwa 50 bis 1000 km². Der relevante Zeithorizont liegt zwischen Stunden und ca. 1 Tag, mit einer mindestens stündlichen bis ca. 5-minütlichen zeitlichen Auflösung. Je stärker und damit seltener ein Ereignis ist, desto mehr sinkt aufgrund der dafür zumeist nur spärlichen Datenlage die Zuverlässigkeit von Aussagen bzgl. Art und Intensität solcher Ereignisse.

Um Auswirkungen des Klimawandels auf die Stärke und Häufigkeit von solchen Starkregen- und zugehörigen Sturzflut-Ereignissen zu beurteilen (DWA 2012), werden Projektionen des Niederschlags (P) für kurze Dauerstufen bzw. Zeitabschnitte (unter einer Stunde) benötigt. Derartige Projektionen sind von den derzeit existierenden dynamischen Klimamodellen nicht mit hinreichender Zuverlässigkeit und zeitlich-räumlicher Auflösung zu erhalten. Alternativ hat sich in den vergangenen Jahren eine neue Perspektive entwickelt: die Betrachtung extremer P-Intensitäten in der notwendigen hohen zeitlichen Auflösung direkt als Funktion der Lufttemperatur (T).

Der Zusammenhang zwischen extremem lokalen Niederschlägen und der örtlichen Lufttemperatur ist statistisch signifikant und gut untermauert. Aus langjährigen Beobachtungsreihen in Westeuropa (Lenderink und van Meijgaard 2008), Deutschland (u. a. Müller & Pfister 2011; Bürger et al. 2014) und darüber hinaus (etwa Panthou et al. (2014) für Kanada, Mishra et al. (2012) für die USA, Hardwick Jones et al. (2010) für Australien) ergab sich, dass extreme Regenintensitäten in stündlicher oder höherer Auflösung um mindestens 7% pro 1K Erwärmung ansteigt. Diese 7%/K entsprechen genau der Clausius-Clapeyron (CC) Beziehung für die Zunahme des (gesättigten) atmosphärischen Wasserdampfs mit steigender Temperatur, weshalb ein entsprechendes Verhalten als "CC scaling" bezeichnet wird. Unter der durch einige Indizien gestützten Annahme, dass die globale Erwärmung nicht zu einem Anstieg der relativen Feuchte führt (Trenberth et al., 2003), ergibt sich aus dem CC scaling eine erste, rein heuristische Abschätzung für die künftige Statistik der extremer Regenintensitäten (Lenderink & Attema, 2015).

Zwischen dieser Approximation "nullter Ordnung" und einer momentan noch nicht realisierbaren vollen, dynamischen, hochaufgelösten Simulation der konvektiven Niederschlagsentstehung nehmen eine Reihe geeigneter Vereinfachungen eine Mittelstellung ein. So benutzen Westra et al. (2013) zur Abschätzung zukünftiger P-Extreme das 'resampling' von historischen Analogien; dies geschieht in Abhängigkeit von großräumigen atmosphärischen Zuständen, u.a. auch der Temperatur. Mithilfe eines weiteren Statistik-Werkzeugs, nämlich der "Kopula"-Methode, verbinden So et al. (2017) statistisch die Extreme der Dauerstufen <1d mit denen

der 1d–Dauerstufe, und wenden dies auf die 1d–Dauerstufen für Ost–Asien an. Wasko and Sharma (2017) implementieren eine Temperatur-Abhängigkeit für Wettergeneratoren und wenden es auf das erwärmte Klima an. Das Ziel unserer Arbeit war es, lokale Zeitreihen der Regenintensität zu erzeugen, die hochaufgelöst und realistisch genug sind, um etwa hydrologische Modelle für städtische Infrastruktur, Ackerbau oder Ökologie antreiben zu können, bei Wahrung der Konsistenz mit einer gegebenen großräumigen Klimasimulation.

2. Methodik

Das Verfahren besteht im Wesentlichen aus zwei Schritten mit dem Ziel verfügbare großräumige atmosphärische Felder in täglicher Auflösung räumlich und zeitlich zu regionalisieren, d.h. auf Stationsbasis in 10–minütlicher Auflösung. Wir definieren hier ein „Jetzt-Klima“ für die Jahre 1961–1990, und ein „Zukunftsklima“ für 2010–2069.

2.1 Expanded Downscaling

Das Expanded Downscaling (XDS) ist eine Regressions-basierte Methode, lokale Wetterereignisse realistisch und zudem so konsistent wie möglich mit der atmosphärischen Zirkulation zu simulieren. Da aber bei der klassischen Regression wegen der absoluten Fehlerminimierung ein Teil der Variabilität verloren geht, enthält das XDS die Nebenbedingung zur Erhaltung der lokalen Kovariabilität. XDS bildet als lineares Modell einen Vektor aus großräumigen atmosphärischen Variablen (aus Beobachtungen, Reanalysen oder Simulationen) auf einen Vektor aus lokalen Variablen ab. Details finden sich in Bürger et al. (2019).

2.2 Multiplikatives Kaskadenmodell MC⁺

Das originale 'multiplicative random cascade' (MC) Modell von Olsson (1998) disaggregiert Niederschläge einer täglichen (oder längeren) Dauerstufe auf kürzere, etwa stündliche oder minütliche Dauerstufen. Dies geschieht kaskadenartig, wobei ein Ereignis aus einer längeren Stufe stochastisch aufgeteilt wird in kürzere Ereignisse. Dabei bestimmen wenige Parameter diese Aufteilung, welche an beobachteten Langzeitreihen mit kurzen Zeitschritten kalibriert werden.

Diese Parameter sind nicht Temperatur-sensitiv. Das führt u.a. dazu, dass MC-disaggregierte Werte nur dann T-sensitiv sind, wenn die ursprüngliche höhere Dauerstufe dies ebenfalls ist. Temperatur-Effekte, die sich unterhalb dieser Dauerstufe abspielen, werden nicht erfasst. Um dies zu ändern, haben wir die MC–Parametrisierung T-abhängig gemacht, und zwar durch eine simple T-Klassifizierung der Kalibrierungsdaten. Das Resultat ist MC⁺, wofür als Input außer dem Niederschlag der höheren Dauerstufe auch die Temperatur derselben dient.

MC und daher auch MC⁺ wird an Mittelwerten und nicht an (seltenen) Extremwerten kalibriert. Damit abgeleitete Extremwerte besitzen daher meist einen Bias, weshalb für beide Varianten (MC und MC⁺) der Bias multiplikativ ausgeglichen wird, Details siehe in Bürger et al. (2019).

3. Datengrundlage

3.1 Atmosphärische Felder

Als atmosphärische Prädiktorfelder dienen großräumige tägliche Gitterwerte des Gesamtniederschlags sowie Temperatur, spezifische Feuchte und Wind aus den höheren Schichten der

Troposphäre (700 hPa und 850 hPa). Diese werden auf wenige dominante Variabilitätsmuster (EOFs) reduziert und ergeben, aneinandergehängt, eine tägliche, multivariate Vektorzeitreihe als Prädiktor. Für Kalibrierung und Validierung dienen die Reanalysen „ERA interim“ des europäischen Zentrums ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, 2009) für die Jahre 1981-1996 und 1997-2010. wir bezeichnen diese Felder und alle daraus simulierten lokalen Reihen als „ANA“. Simulierte Felder stammen vom Klimamodell MPI-ESM-MR (Giorgetta et al., 2012), welches historische (20. Jahrhundert, bezeichnet als „CUR“) und zukünftige Klimabedingungen (21. Jahrhundert, RCP4.5-basiert, abgekürzt „FUT“) generiert. Zum Input für XDS werden alle Felder auf dasselbe Gitter in dem Rechteck zwischen [11W,22N] und [40E,62N] interpoliert, welches in etwa Nordafrika, das Mittelmeergebiet und Europa, mit Ausnahme Nordskandinaviens und Nordrusslands umfasst.

3.2 Langjährige Niederschlagsdaten in der Emscher-Lippe-Region

Untersucht wurden Niederschlagsdaten von 21 langjährig beobachteten Stationen der Emschergenossenschaft und des Lippeverbands (EGLV), die seit den 1930er Jahren kontinuierlich in einer Auflösung von 1 Minute vorliegen (Pfister 2006). EGLV betreiben aufgrund ihrer gesetzlichen wasserwirtschaftlichen Aufgaben ein dichtes Messnetz, das zum Teil Aufzeichnungen über 120 Jahre umfasst und von daher eine außergewöhnlich gute und belastbare Datenbasis darstellt. Hinzu kommt, dass diese auch über den gesamten Zeitraum Qualitäts-

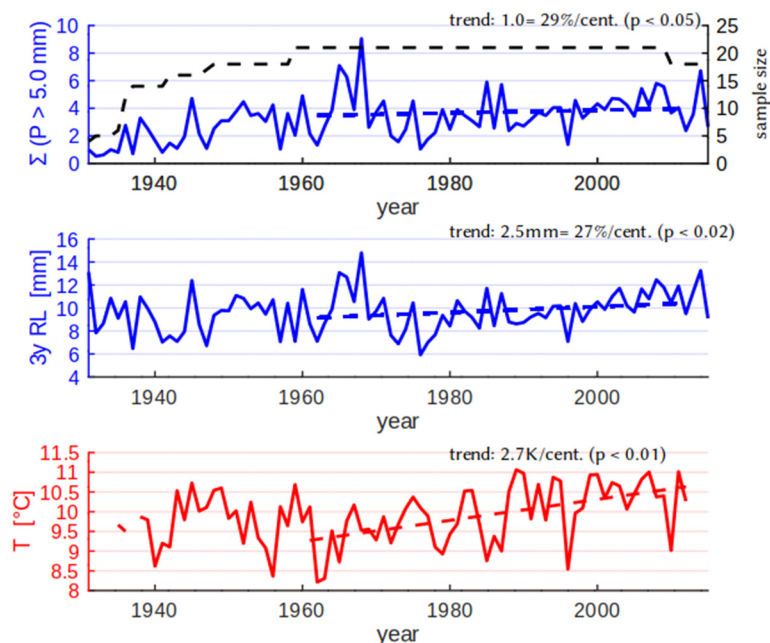


Abb. 1: Oben: Jährliche Entwicklung der Zahl extremer 10-min. P Ereignisse ($>5\text{mm}$, Schnitt über alle Stationen) (durchgez. Linie), mit Trend für die Teilperiode 1961–2013 der maximalen Abdeckung. Mitte: Dasselbe für 3-J Wiederkehrniveaus. Unten: Temperaturentwicklung. Zum Vergleich die Zahl der Stationen (Oben, gestrichelt).

kontrollen und Datenprüfungen unterliegen. Heute sind standardmäßig Pluviometer im Einsatz. Die historischen Daten wurden in den 1990er Jahren digitalisiert und gegebenenfalls lückenbereinigt. Hier reichen die Methoden von einfachen Regressionsanalysen bis hin zu komplexen statistischen Analysen (Johann et al. 1998). Alle Standorte werden online übertragen und gehen größtenteils in das EGLV-interne Hochwasserinformationssystem mit integriertem Warnmanagement ein.

Einige dieser Stationen wurden von Mueller und Pfister (2011) und Bürger et al. (2014) bereits auf Trends untersucht. Um sie für die MC+-Kalibrierung verwenden zu können, wurden zunächst die 1-Minuten-Daten zu 10-Minuten-Blöcken aggregiert. Als Plausibilisierung der Arbeiten von Müller und Pfister (2011) wurden hier nun jährliche Überschreitungszahlen (ÜS) für einen Schwellenwert von 5 mm ermittelt. Zu beachten ist, dass Trends in den Wiederkehrniveaus in der Regel durch eine kombinierte Änderung der Häufigkeit und der Intensität der Extremereignisse verursacht werden, die hier nicht separat analysiert wird.

4. Untersuchungsergebnisse

4.1 Validierung

Die über alle 21 Stationen gemittelten Statistiken ÜS und WN für P Extreme aus Beobachtungen sind in Abbildung 1 dargestellt, zusammen mit der Temperatur. Für den Zeitraum 1961–2013 der maximalen gemeinsamen Messperiode aller Stationen ergeben sich positive Jahrhunderttrends sowohl für ÜS (+29%, $p < 0.05$) als auch WN (+27%, $p < 0.02$); die mittlere Erwärmung beträgt +2.7K pro Jahrhundert. Zum Vergleich siehe auch Mueller und Pfister (2011).

Um genauer zu untersuchen, wie Regenextreme mit der Temperatur zusammenhängen und ob möglicherweise ein CC-scaling vorliegt, betrachten wir in Abbildung 2 diese Abhängigkeit für eine Aufteilung der Temperatur in 2K Abschnitte zwischen 6°C und 26°C und schätzen für jeden davon das obere 99.9%-Quantil. Dies erfolgt sowohl für die beobachteten Daten der Dauerstufe 10 Minuten, als auch für die aus der täglichen Dauerstufe disaggregierten Daten

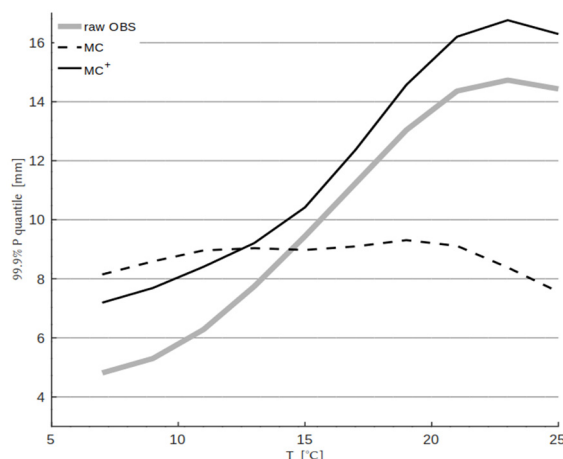


Abb. 2: T-Abhängigkeit der P-Extreme abgeschätzt aus der beobachteten 10-min Dauerstufe (grau, alle 21 Stationen), und disaggregiert aus der beobachteten täglichen Dauerstufe mit MC (gestrichelt) und MC+ (durchgezogen). Die Werte wurden mittels einer Kernel-Regression geglättet.

von MC und MC⁺. Es ist deutlich, dass die Beobachtungen stark ansteigen, bis sie ab etwa 22°C eine gewisse Sättigung erfahren; dasselbe Verhalten zeigen die MC⁺-Daten, allerdings mit einem positiven Bias. Im mittleren T-Bereich folgen beide Datensätze etwa dem CC scaling (cf. G. Lenderink & van Meijgaard, 2008), während die MC-Werte keine T Abhängigkeit aufweisen.

Räumliches Downscaling auf Tagesbasis

Die Brauchbarkeit von XDS für Anwendung etwa für hydrologische Modell, speziell für die Abschätzungen von Extremereignissen, ist hinreichend dokumentiert (Bürger et al., 2019). Um die Entwicklung der simulierten Dauerstufen unterhalb eines Tages zu verstehen, werfen wir zunächst einen Blick auf die simulierten Tages-Dauerstufen. Abbildung 3 zeigt jährliche Mittel- und Maximalwerte für tägliche Temperatur und Niederschlag, basierend auf Beobachtungen und XDS-Simulationen. Man sieht, dass die Langzeitklimatologie recht gut getroffen wird und dass die allgemeine interannuelle Variabilität realistisch ist (für T besser als für P). Für eine Interpretation des Zukunftssignals kommt es hierbei hauptsächlich auf die beiden Simulationen CUR vs. FUT an. Deutlich zu sehen ist ein Anstieg bei der Temperatur und ein fast stationäres Verhalten beim Niederschlag.

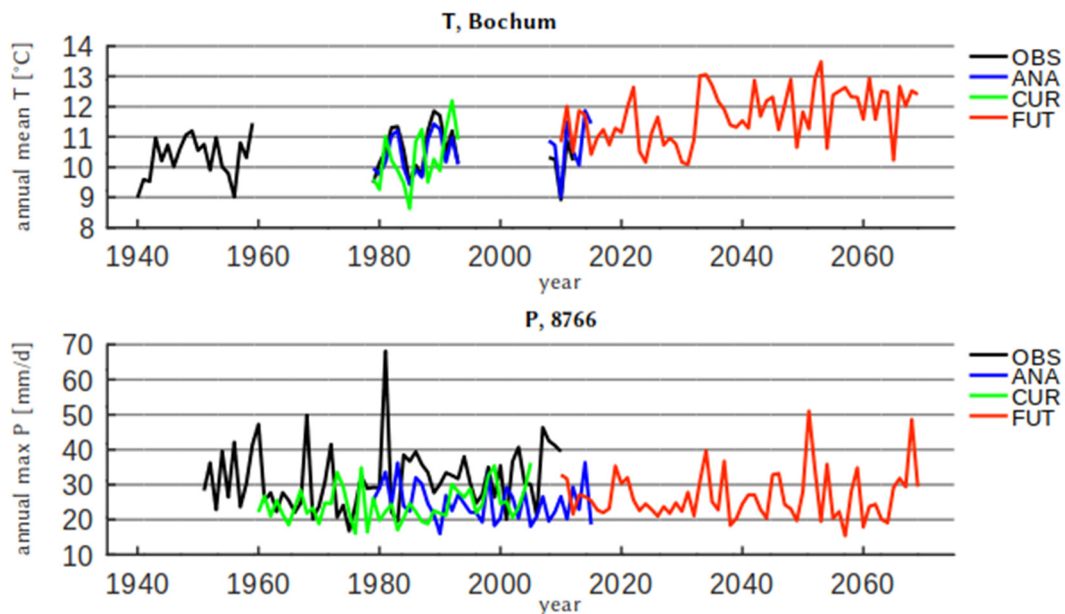


Abb. 3: Jährliche Mittel- (oben: T, Station Bochum) und Maximalwerte (unten: P, Station Bönning) einer typischen XDS Simulation auf täglicher Basis aus den Antriebsfeldern ANA (blau), CUR (grün) und FUT (rot); Beobachtungen (OBS, schwarz) zum Vergleich.

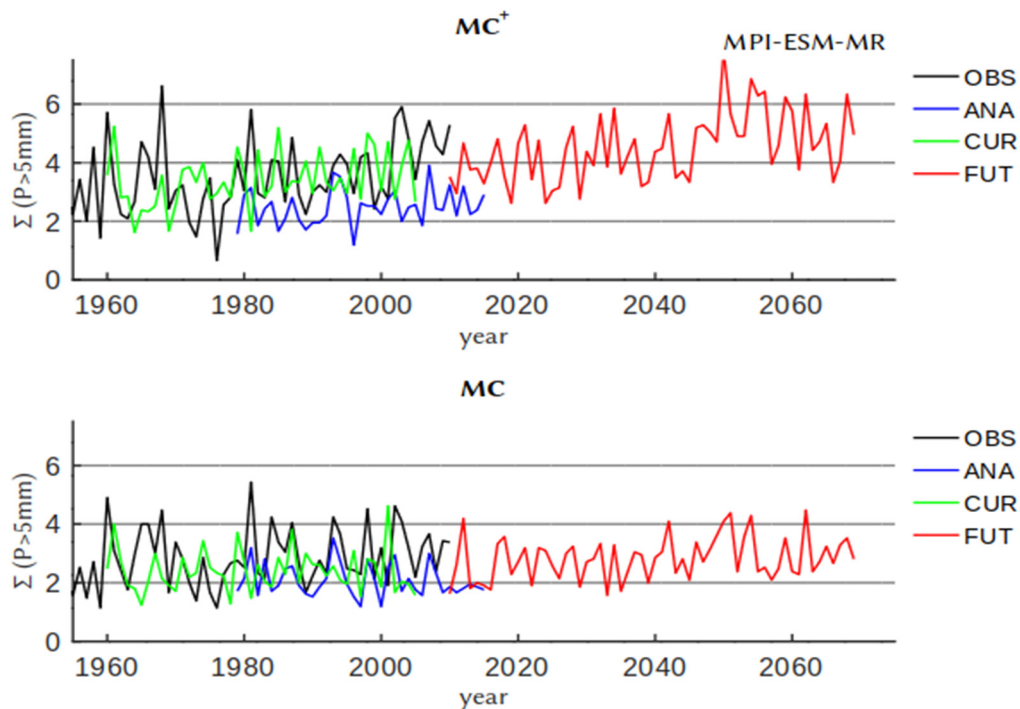


Abb. 4: Ähnlich Abbildung 1, oben, Jahreswerte der ÜS der MC-Disaggregation (unten) und MC⁺ (oben), angetrieben von täglichem Niederschlag (und Temperatur für MC⁺) wie Abbildung 3.

Zeitliches Downscaling für die 10-min Dauerstufe

Mit steigendem T sollte das CC scaling (s. Abbildung 2) einen zusätzlichen Effekt von T auf P für die kürzere (< 1d) Zeitskala erzeugen - und zwar auch ohne einen entsprechenden Trend im täglichen P wie in unseren Simulationen: Die wärmeren Temperaturen führen zu einer Verschiebung in Richtung größerer Extreme. Der Effekt wird in Vergleichen von MC- und MC⁺-Disaggregationen deutlich, die auf den gleichen Satz von Simulationen (Abbildung 3) angewendet werden. Die nächsten beiden Abbildungen zeigen die ÜS- und WN-Statistiken der entsprechenden disaggregierten Daten. Für ÜS zeigt Abbildung 4, dass für das gegenwärtige Klima Mittelwert und Variabilität für beide MC-Versionen zufriedenstellend reproduziert werden. Für die Zukunft ist ein klarer Unterschied zwischen MC und MC⁺ offensichtlich, denn MC bleibt im Wesentlichen stationär und MC⁺ zeigt einen deutlich steigenden Trend. Abbildung 5 zeigt das Analoge für WN: Hier ist allerdings das gegenwärtige Klima schlechter reproduziert, mit reduziertem Mittelwert und Variabilität für MC⁺, insbesondere für ANA; vergleichbar dem Bias in Abbildung 3.

Dessen ungeachtet sind die simulierten positiven Trends (für Gegenwart und Zukunft) in Abbildung 5 ein robustes Merkmal von MC und insbesondere von MC⁺. Im Detail zeigt dies Tab. 1: die Jahrhundert-Trends sind, falls signifikant, durchweg positiv, und für MC⁺ stärker, mit einem für das 21. Jahrhundert prognostizierten Anstieg von mehr als 3 mm für WN. Vergleicht man den beobachteten Trend der 10-min. Dauerstufe mit den MC- und MC⁺-Simulationen für die Gegenwart (Mittel aus OBS, ANA und CUR), so erhält man für ÜS einen Wert von

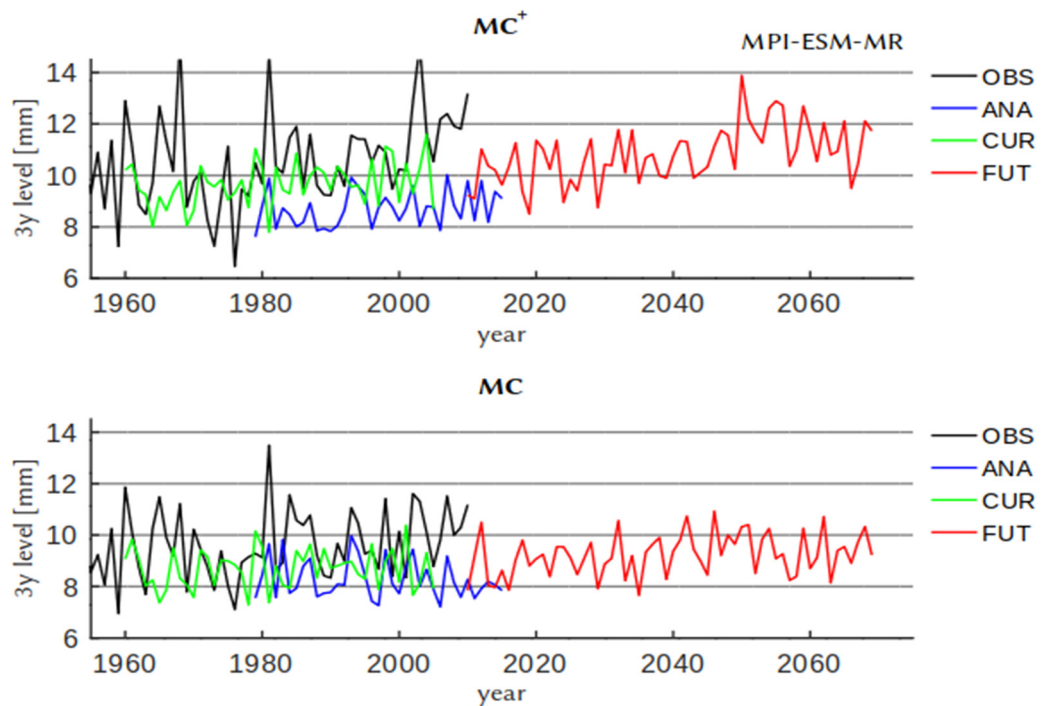


Abb. 5: Wie Abbildung 4, für WN.

+1.0 Ereignisse, für MC +0,2 und für MC⁺ +1,9; für WN stehen hier +2,5 mm aus Beobachtungen +0,3 mm für MC und +2,2 mm für MC⁺ gegenüber. Das allgemeine Niveau der simulierten ÜS- und WN-Werte in den Abbildungen 4 und 5 sind für die Gegenwart meist ähnlich für MC und MC⁺, mit Ausnahme der WN OBS-Werte, die einige große Ausreißer für MC⁺ zeigen; die FUT-Werte sind höher für MC⁺, was offensichtlich auf die stärkeren Trends zurückzuführen ist.

Tab. 1. Trend in ÜS und WN pro Jahrhundert für alle Simulationen, in den Einheiten Anzahl (ÜS) und mm (WN). Signifikant positive Trends (Mann-Kendall mit $p < 5\%$, sind fett dargestellt.

Trend/Jhdt.	OBS		ANA		CUR		FUT	
	1951–2010		1979–2015		1960–2005		2010–2069	
	ÜS	WN	ÜS	WN	ÜS	WN	ÜS	WN
MC	1.4	1.9	-0.9	-1.3	0.0	0.4	1.1	1.4
MC ⁺	2.3	2.8	1.3	1.9	2.1	1.9	3.1	3.2

Schließlich untersuchen wir den besonderen Einfluss der Temperatur auf das Niederschlagsklimasignal genauer. Zu diesem Zweck zeigen wir in Abbildung 6, ähnlich wie Abbildung 2, die T-Abhängigkeit der extremen (99,9%) P-Quantile für MC und MC⁺, für die 10-Minuten-Beobachtungsdaten sowie für alle disaggregierten Simulationen. Wie erwartet, sehen wir für MC das gleiche T-unempfindliche Verhalten wie in Abbildung 2; CUR und insbesondere ANA zeigen sogar eine negative T-Abhängigkeit. Für MC⁺ hat nur ANA keine T-Abhängigkeit. Die si-

mulierten Klimabedingungen der Gegenwart (CUR) und Zukunft (FUT) zeigen ähnliche Eigenschaften, wobei die CUR-Werte etwas unter FUT liegen. Bei beiden sieht es nach einer linearen T-Abhängigkeit aus (d.h. kein CC scaling), was allerdings zum einen ein Artefakt der starken Kernelglättung sein kann, und zum anderen am allgemeinen Bias in der Modellierungskette liegen kann, s.u.

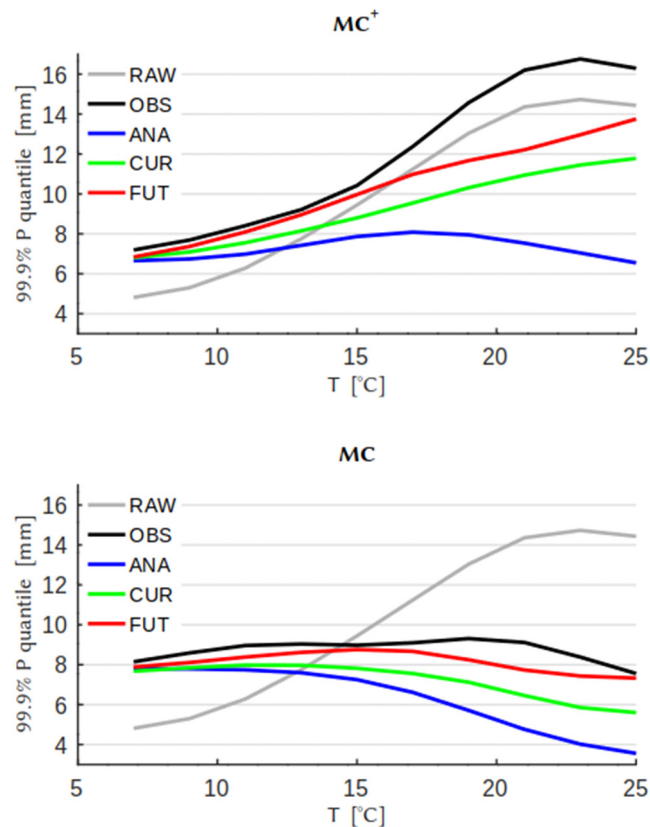


Abb. 6: Ähnlich wie Abb. 2, T-Abhängigkeit der P-Extreme aus MC (unten) und MC⁺ (oben) Simulationen.

5. Schlussfolgerungen

Bevor dynamische und hoch-aufgelöste globale Klimasimulationen zuverlässig eingesetzt werden können, kann man die Lücke von den globalen Emissions-Skalen zu den lokalen Skalen der Starkregen mit einfacheren empirischen Methoden überbrücken. Wir haben ein zwei-stufiges Verfahren vorgeschlagen: räumlich, von der globalen zur lokalen Tagesskala mit einem "konventionellen" Downscaling, und zeitlich durch eine T-abhängige Disaggregation der Tageswerte auf den Kurzfristbereich. Das Modell kann problemlos an Impakt-Modelle, etwa zur Bewertung des künftigen Risikos für urbane Überflutungen oder der Bodenerosion in der Landwirtschaft, gekoppelt werden.

Die möglichen Vorbehalte zu unserem Ansatz sind zahlreich. Dazu gehört der positive Bias für P-Extreme; dies erfordert eine Anpassung des ursprünglichen MC-Modells und kann vermutlich in einer zukünftigen Version behoben werden kann. Schwerer wiegen die Unstimmigkeiten von Abbildung 6: Während die Unterschiede zwischen CUR und ANA vermutlich aus

Fehlern im antreibenden GCM (MPI-ESM-MR) resultieren, ist die Diskrepanz zwischen ANA und OBS ein Hinweis auf ein Downscaling-Problem, vermutlich an der Schnittstelle zwischen XDS und MC⁺.

Trotz solcher Vorbehalte fassen wir die wichtigsten Prozesse zusammen, welche sich robust in dem 2-stufigen Downscaling der globalen und lokalen Auswirkungen widerspiegeln: Die durch die tägliche Zeitskala induzierte Veränderung von P ist globalen Ursprungs, verursacht durch eine veränderte Zirkulation, die mehr Feuchtigkeit von den Ozeanen in Richtung des Landes transportiert, wo sie als Niederschlag ausfällt. Für die Kurzfrist-Dauerstufe überlagert sich ein zweiter, meist unabhängiger und lokaler Effekt, und zwar die erhöhte Wasserdampfspeicherung erwärmter Luft. In unserer Beispielregion Emscher/Lippe sahen wir, dass kein signifikantes Signal aus den globalen Bedingungen erkennbar war, sondern ein zusätzliches Ansteigen der P-Extreme allein durch die lokale Erwärmung. Wir deuten dies so, dass wenn alle anderen Merkmale der Konvektion im wärmeren Klima gleich bleiben, sich die Kurzfrist-Starkregen je nach dem (nur von der Region abhängigen) Grad der T-Abhängigkeit verstärken einfach aufgrund der wärmeren Atmosphäre (bei genauem CC scaling um 7%/K); ein entsprechendes Verhalten wird in ersten dynamischen, konvektionserlaubenden Simulationen beobachtet, wenn auch von relativ kurzer Dauer (Drobinski et al., 2018).

Wenn in anderen Regionen – oder durch eine andere Klimasimulation – ein positives globales Signal vorliegt, z. B. durch eine veränderte Zirkulation oder eine wachsende relative Luftfeuchtigkeit, überlagern sich sowohl die globalen als auch lokalen Signale und könnten noch größere P-Extreme erzeugen.

Danksagung

Wir bedanken uns bei der Emschergenossenschaft und dem Lippeverband und insbesondere bei Angela Pfister für die Bereitstellung der Niederschlagsdaten. Frau Pfister war außerdem sehr hilfreich bei der Verfassung dieses Aufsatzes.

Literatur

- ASCE, 1992: Design and construction of urban stormwater management systems. American Society of Civil Engineers and Water Environment Federation, 724 pp
- Bronstert, A., et al. 2018: Forensic hydro-meteorological analysis of an extreme flash flood: The 2016-05-29 event in Braunsbach, SW Germany. *Sci. Total Environ.*, 630, 977–991, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.241>.
- Bürger, G M. Heistermann, and A. Bronstert, 2014: Towards sub-daily rainfall disaggregation via Clausius–Clapeyron. *J. Hydrometeor.*, 15, 1303–1311, <https://doi.org/10.1175/JHM-D-13-0161.1>.
- Bürger, G., Pfister, A., & Bronstert, A. (2019). Temperature-Driven Rise in Extreme Sub-Hourly Rainfall. *Journal of Climate*, 32(22), 7597–7609. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0136.1>
- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA), 2012: Arbeitsblatt DWA-A 531. Starkregen in Abhängigkeit von Wiederkehrzeit und Dauer. Hennef (DWA-Regelwerk, A 531).

- Drobinski, P., Da Silva, N., Panthou, G., Bastin, S., Muller, C., Ahrens, B., et al. (2018). Scaling precipitation extremes with temperature in the Mediterranean: past climate assessment and projection in anthropogenic scenarios. *Climate Dynamics*, 51(3), 1237–1257.
- European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. (2009). ERA-Interim Project. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. <https://doi.org/10.5065/D6CR5RD9>
- Giorgetta, M., Jungclaus, J., Reick, C., Legutke, S., Brovkin, V., Crueger, T., et al. (2012). CMIP5 simulations of the Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M) based on the MPI-ESM-MR model: The rcp45 experiment, served by ESGF [Data set]. World Data Center for Climate (WDCC) at DKRZ. <https://doi.org/10.1594/wdcc/cmip5.mxmr4>
- Grüning, H. und Pecher K.H., 2020: Kanalnetzplanung und Überflutungsvorsorge. ISBN: 978-3-8356-7383-0/7, Essen: Vulkan Verlag
- Hardwick Jones, R., Westra, S., & Sharma, A. (2010). Observed relationships between extreme sub-daily precipitation, surface temperature, and relative humidity. *Geophysical Research Letters*, 37(22).
- Johann, G., I. Papadakis, and A. Pfister, 1998: Historical precipitation time series for applications in urban hydrology. *Water Sci. Technol.*, 37, 147–153, [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(98\)00327-8](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(98)00327-8).
- Lenderink, G., & van Meijgaard, E. (2008). Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature changes. *Nature Geoscience*, 1(8), 511–514.
- Mishra, V., Wallace, J. M., & Lettenmaier, D. P. (2012). Relationship between hourly extreme precipitation and local air temperature in the United States. *Geophysical Research Letters*, 39(16). <https://doi.org/10.1029/2012GL052790>
- Mueller, E. N., & Pfister, A. (2011). Increasing occurrence of high-intensity rainstorm events relevant for the generation of soil erosion in a temperate lowland region in Central Europe. *Journal of Hydrology*, 411(3), 266–278.
- Olsson, J. (1998). Evaluation of a scaling cascade model for temporal rain-fall disaggregation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2, 19–30.
- Panthou, G., Mailhot, A., Laurence, E., & Talbot, G. (2014). Relationship between Surface Temperature and Extreme Rainfalls: A Multi-Time-Scale and Event-Based Analysis. *Journal of Hydrometeorology*, 15(5), 1999–2011. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0020.1>
- Pfister, A., 2006: Niederschlag als Input für Niederschlag-Abfluss- Modelle im Emscher- und Lippegebiet, Beiträge zum Seminar am 26./27. April 2006 in Magdeburg, 103–123.
- Salles, C., J. Poesen, and G. Govers, 2000: Statistical and physical analysis of soil detachment by raindrop impact: Rain erosivity indices and threshold energy. *Water Resour. Res.*, 36, 2721–2729, <https://doi.org/10.1029/2000WR900024>.
- So, B.-J., Kim, J.-Y., Kwon, H.-H., & Lima, C. H. R. (2017). Stochastic extreme downscaling model for an assessment of changes in rainfall intensity-duration-frequency curves over South Korea using multiple regional climate models. *Journal of Hydrology*, 553, 321–337. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.07.061>
- Trenberth, K. E., Dai, A., Rasmussen, R. M., & Parsons, D. B. (2003). The changing character of precipitation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 84(9), 1205–1217.

- Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., et al. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109(1–2), 5.
- Wasko, C., & Sharma, A. (2017). Continuous rainfall generation for a warmer climate using observed temperature sensitivities. *Journal of Hydrology*, 544, 575–590. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.12.002>
- Westra, S., Evans, J. P., Mehrotra, R., & Sharma, A. (2013). A conditional disaggregation algorithm for generating fine time-scale rainfall data in a warmer climate. *Journal of Hydrology*, 479, 86–99.
- Wood, F., A. L. Heathwaite, and P. Haygarth, 2005: Evaluating diffuse and point phosphorus contributions to river transfers at different scales in the Taw catchment, Devon, UK. *J. Hydrol.*, 304, 118–138, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.07.026>.

Generierung von Niederschlagsintensitäten aus Kfz-Sensordaten durch Kalibrierung an Niederschlagsradaren und Pluviometern

Mark Braun, Magnus Hoffmann, Sajjad Tabatabaei, Adrian Treis,
Dimitri Falk, Etienne Costa-Patry

Zusammenfassung

Einige ursprünglich für den Fahrerkomfort in heutigen Fahrzeugen verbaute Sensoren bieten das Potenzial, Mehrwerte für verschiedene wasserwirtschaftliche Anwendungen zu generieren. Das Forschungsprojekt *mobile^{VIEW}* untersucht dazu Kfz-Sensoren, für die ein Zusammenhang zu Niederschlagsereignissen nachgewiesen werden kann. In Kombination der zeitlich und räumlich hoch aufgelösten Kfz-Sensordaten mit Niederschlagsradar- und Pluviometermessungen kann eine präzisere Quantifizierung von Niederschlagsintensitäten und Verortung der Ereignisse erreicht werden. Dieser Ansatz bietet Mehrwerte für die Starkregenvorhersage, das Warnmanagement sowie die Steuerung von Verkehr und wasserwirtschaftlichen Anlagen.

1. Kfz-Sensordaten als Datengrundlage für wasserwirtschaftliche Anwendungen

Die heutige Generation von Kraftfahrzeugen erhebt eine Vielzahl von Sensordaten. Regensensoren messen bspw. die Benetzung der Windschutzscheibe, um die Scheibenwischerfrequenz zu regulieren, Lichtsensoren ermöglichen eine automatische Steuerung des Abblendlichtes. Die entsprechenden Sensoren werden primär zur Steuerung von Komfort- und Sicherheitsfunktionen eingesetzt, haben jedoch auch das Potenzial, im Sinne von mobilen Messstationen, einen Mehrwert für wasserwirtschaftliche Anwendungen zu generieren. Die Herausforderung für eine automatisierte Umsetzung besteht darin, aus den erhobenen Sensordaten valide Niederschlagsinformationen zu ermitteln.

Die Fragestellung, ob Kfz-Sensordaten für eine Nutzung im Rahmen wasserwirtschaftlicher Anwendungen prinzipiell geeignet sind, ist einer der zentralen Schwerpunkte des Forschungsprojektes *mobile^{VIEW}*. Das Verbundprojekt wird über die mFUND-Forschungsinitiative des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur gefördert und thematisiert die Echtzeit-Verdichtung von Niederschlagsinformationen durch Kfz-Sensordaten. Das Konsortium aus Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RWTH Aachen (FiW) e. V., Emshergenossenschaft/Lippeverband (EGLV) und der IAV GmbH entwickelt während der dreijährigen Projektlaufzeit ein Informationsmodell, in dem aus Kfz-Daten Niederschlagsinformationen generiert werden sollen. Herausgestellt werden soll das Potenzial im Bereich der Starkregenprognose und des Warnmanagements, um im Idealfall Reaktionszeiten zur Umsetzung von Maßnahmen zu verkürzen sowie Personen- und Sachschäden zu reduzieren.

2. Charakteristiken und messtechnische Erfassung von Starkniederschlagsereignissen

Besonders im Rahmen der Starkregenprognose haben Echtzeit-Daten das Potenzial, die aufgetretenen Schäden infolge von Starkregenereignissen zukünftig zu reduzieren. Der Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) geht aufgrund des fortschreitenden Klimawandels zukünftig von einer Zunahme an extremen Wetterlagen, darunter u.a. Starkregen, aus (IPCC, 2013). Dadurch entsteht für Akteure, die für die Siedlungsentwässerung und den Überflutungsschutz verantwortlich sind, konkreter Handlungsbedarf. Starkregenereignisse sind durch eine hohe Dynamik gekennzeichnet, die eine entsprechend hohe zeitliche und räumliche

Auflösung der Messdaten erfordert. Stationsgebundene Niederschlagsmessungen können Ereignisse durch deren lokales Auftreten verpassen oder zeichnen diese nur in Teilen auf. Für die Bestimmung von Gebietsniederschlägen werden in Deutschland im Wesentlichen Niederschlagsradarmessungen und terrestrische Niederschlagsstationen (Pluviometer) verwendet. Radarniederschlagsmessungen stellen ein indirektes Messverfahren dar, das spezifischen Fehlerquellen wie z. B. Dämpfungseffekten unterliegt, die zu einer Unterschätzung des Ereignisses führen können (Pfister, Treis, & Teichgräber, 2015). In einer quantitativen Anwendung sollten diese zwingend korrigiert werden. Aufgrund der mit der Entfernung zum Radarstandort ansteigenden Höhe der Reflektivitätsmessung kann es außerdem zu einer lateralen Drift von fallendem Niederschlag kommen, wodurch Niederschläge nicht an der gemessenen Stelle auf die Erdoberfläche treffen. Weiterhin liegen Niederschlagsradarprodukte bislang nur in Messintervallen von fünf Minuten bis zu einer Stunde vor (DWA, 2017). Die rasante Entwicklung und Verlagerung von Starkregenereignissen wird bei einer solchen zeitlichen Auflösung oftmals nicht in der nötigen zeitlichen Auflösung erfasst, um Ereignisse präzise abzubilden. Pluviometer hingegen stellen punktuelle Messungen dar. Je nach Dichte des Messstellennetzes und Wetterlage kann die Qualität der abgeleiteten Gebietsniederschläge stark variieren. Trotz der hohen Zahl von rund 75 Messstationen im fast 4.200 km² großen Einzugsgebiet von EGLV werden konvektive Ereignisse mit einer geringen räumlichen Ausdehnung vom terrestrischen Messnetz mitunter nicht erfasst.

Ein weiterer Faktor für das Auftreten hoher Schadenssummen infolge von Starkniederschlägen ist fehlendes Risikobewusstsein in der Bevölkerung. Im Gegensatz zu fluvialen Hochwassern, deren Auftreten zwangsläufig an ein Gewässer geknüpft ist, können Starkregenereignisse überall auftreten. Die ansässige Bevölkerung ist oft nicht mit den Gefahren und Schadenspotenzialen von Überflutungen vertraut und dementsprechend nicht in geeigneter Weise vorbereitet. So sind statt der bekannten Überschwemmungsgebiete an Fließgewässern auch gewässerferne urbane Siedlungsgebiete mit hohem Schadenspotenzial von Überflutungen infolge von Starkregen betroffen. Wird dabei die Bemessungsgrenze der Kanalisation überschritten, kommt es zusätzlich zu Überstau und weiteren Überflutungen.

3. Potenzial des Forschungsprojektes mobile^{VIEW}

Das Forschungsprojekt mobile^{VIEW} zielt darauf ab, eine neue Datenquelle zu generieren, die die bestehenden Niederschlagserfassungsmethoden ergänzt und in Echtzeit zur Verfügung gestellt werden kann. Darüber hinaus wird die Verarbeitungskette von den erfassten Kfz-Sensordaten bis zum kombinierten Niederschlagsprodukt entwickelt und für interessierte Nutzer und Folgeanwendungen bereitgestellt. Der Lösungsansatz von mobile^{VIEW} umfasst die Erhebung, Übertragung und Echtzeit-Analyse von Sensordaten aus fahrenden Kfz. Durch Kombination der erhobenen Sensordaten mit den bestehenden Niederschlagsradar- und Pluviometermessungen sollen die ermittelten Werte für Gebietsniederschläge zeitlich, räumlich und quantitativ ergänzt und korrigiert werden (s. Abbildung 1). Als Zielprodukt wird eine Multi-Source-Precipitation-Map (MSPM) angestrebt, in der die drei Datenquellen miteinander kombiniert dargestellt werden können.

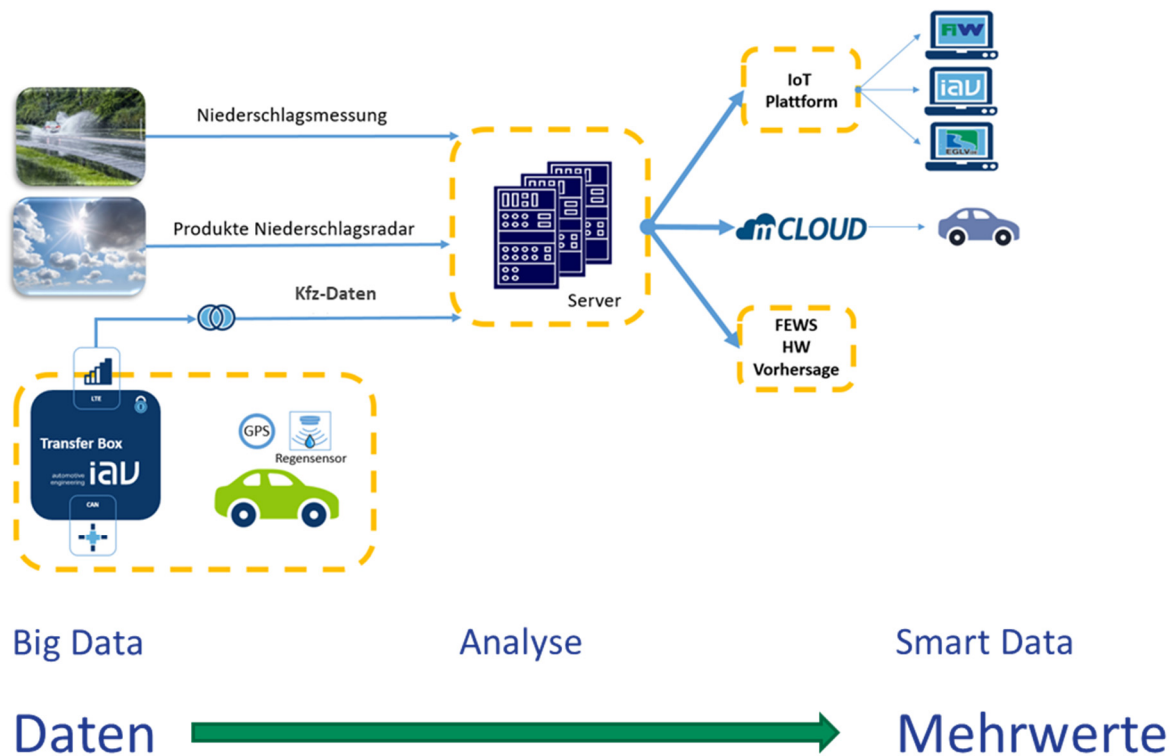


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Konzeptes von mobile^{VIEW}.

Die für die Datenerhebung notwendigen Sensoren sind heutzutage standardmäßig in den Autos verbaut, sodass die Nutzung dieses Synergieeffektes keinen Einbau zusätzlicher Hardware erfordert. Da es sich bei der Erhebung von GPS-Daten um personenbezogene Daten handelt, wurden neben der Pseudonymisierung von Datensätzen auch weitere technisch-organisatorische Maßnahmen ergriffen, um den Datenschutz im Projekt bestmöglich sicherzustellen. Weiterhin sind die zeitweise Deaktivierung der Tracking-Funktion sowie die nachträgliche Löschung von aufgezeichneten Fahrzeugdaten möglich.

Für die Umsetzung der Projektidee hat das Konsortium zunächst eine Fahrzeugflotte von 100 Kfz von EGLV mit einer geeigneten Datenübertragungstechnik ausgestattet. Bei Fahrzeugen ohne serienmäßig verbauten Regen-Licht-Sensor wurde nachträglich ein reversibler Einbau realisiert. Die erhobenen Kfz-Sensordaten werden über Mobilfunk an einen zentralen Server übertragen, es erfolgt eine Übertragung von einem kompletten Datensatz an Sensordaten pro Sekunde. Auf dem Server werden die Datensätze automatisiert auf Vollständigkeit überprüft, da die Daten bspw. ohne Ort- und Zeitstempel keinen Mehrwert liefern können. Im Rahmen einer Vorverarbeitung (Pre-Processing) werden aus den Rohdaten weitere Merkmale abgeleitet. Einige Sensorwerte liefern ohne vorherige Bearbeitung keinen plausiblen Zusammenhang zu Niederschlagsereignissen, bspw. die Temperatur, die als Rohwert wenig aussagekräftig ist, während die Betrachtung eines Gradienten einen Zusammenhang beinhalten kann. Zudem stellen viele der erhobenen Daten lediglich Statusmeldungen dar oder wurden primär für den Fahrerkomfort im Auto integriert und liefern daher keinen Mehrwert für wasserwirtschaftliche Fragestellungen. Nach eingehender Analyse dieser Rohdaten finden folgende Kfz-Sensordaten Eingang in das nachgeschaltete Informationsmodell (Tabelle 1):

Tabelle 3: Berücksichtigte Kfz-Sensordaten im mobile^{VIEW}-Informationsmodell.

Sensor	Einheit
GPS-Signal	Zeitstempel, Längen-/Breitengrad
Regensensor	Reflektivität [%]
Scheibenwischerfrequenz	Hübe/min
Temperatursensor	°C
Lichtsensor	Lux

Im Anschluss fließen die relevanten vorverarbeiteten Daten, zusammen mit Niederschlagsradar- und Pluviometerwerten, im Informationsmodell zusammen. In diesem wird eine Klassifikation der eingehenden Kfz-Sensordaten in Niederschlagsintensitätsklassen vorgenommen. Als Zielsystem ist ein Prognosemodell angestrebt, in dem Niederschlagsintensitäten generiert werden. Diese Intensitätswerte werden daraufhin in einem bayesschen Verfahren mit den aktuell verfügbaren Niederschlagsradar- und Pluviometerwerten verschnitten. Aktuell wird ein geeigneter Wirkungsradius für die durch die Kfz ermittelten Niederschlagsintensitäten ermittelt. Jede Datenquelle erhält im Informationsmodell ein spezifisches Vertrauens- bzw. Konfidenzintervall. Das Vertrauensintervall der Pluviometer wurde an Schellart et al. angelehnt und mit 25 % beziffert (Schellart, Wang, & Onof, 2012). In Anlehnung an Krämer et al. wurde als Vertrauensintervalle von Niederschlagsradarmessungen in Abhängigkeit der Entfernung vom Radarstandort ebenfalls 25 % gewählt (Krämer, Treis, & Pfister, 2019). Die Vertrauensintervalle der Kfz-Sensordaten variieren stark in Abhängigkeit der Niederschlagsintensität und stellen Erfahrungswerte aus der nachträglichen Betrachtung von Niederschlagsereignissen während des Projektzeitraums dar. Das Ergebnis der Kombination der drei Datenquellen und somit des Informationsmodells wird in einer MSPM visualisiert.

Aufgrund der unterschiedlichen zeitlichen Auflösung der verschiedenen Niederschlagsprodukte erfolgt eine Aggregation der Echtzeit-Pluviometerdaten und Kfz-Daten auf die zeitliche Auflösung des Radarprodukts. Das von EGLV nachprozessierte DX-Produkt des Deutschen Wetterdienstes (DWD) wird in Fünfminuten-Intervallen zur Verfügung gestellt, dementsprechend wird alle fünf Minuten eine MSPM generiert. Im späteren Zielprodukt werden mittels raum-zeitlicher Interpolation des Radarprodukts eine minütliche MSPM-Bereitstellung sowie eine minütliche Bereitstellung der terrestrischen Niederschlagsaufzeichnungen angestrebt.

4. Ergebnisse aus der Rohdatenanalyse

Die Betrachtung der Kfz-Sensordaten lässt bereits einige Schlüsse auf die Eignung von Kfz-Sensoren für wasserwirtschaftliche Fragestellungen zu. Im Folgenden werden die einzelnen Sensoren beschrieben und die bisherigen Erkenntnisse dargestellt:

a) Regensensor

Der Reflektivitätswert des Regensensors wird über ein opto-elektronisches Verfahren ermittelt. Der Sensor misst die Reflektivität von elektromagnetischer Strahlung im Bereich des Infrarots an der Windschutzscheibe. Je höher der Benetzungsgrad der Windschutzscheibe mit Wasser, desto geringer der Reflexionsgrad. Der Regensensor gibt dabei Werte in elf Abstufungen,

von 0 bis 100 %, aus. Eine Fahrstrecke von mehreren Minuten, in der ein Regensensor eine konstante Reflektivität zwischen 10 % und 90 % ausgab, konnte nicht beobachtet werden. Diese Beobachtung legt die Vermutung nahe, dass die zwischen 0 und 100 % liegenden Abstufungen Zwischenwerte auf dem Weg zum Minimal- bzw. Maximalwert darstellen.

Eine differenzierte Quantifizierung der Niederschlagsintensität kann alleine durch die Regensensoren nicht realisiert werden. Die in mobile^{VIEW} verwendeten Regensensoren erreichen eine Sättigung von 100 % vergleichsweise schnell (vgl. Abbildung 2), auch bereits bei Intensitäten, die gemäß der Kategorisierung des Deutschen Wetterdienstes (DWD) einem leichten bis mäßigen Niederschlagsereignis (DWD, 2020) entsprechen. Als Vergleichswerte wurden Pluviometer in einer Entfernung von maximal 1,5 km herangezogen. Es treten auch Abweichungen zwischen Regensensor und Pluviometer bezüglich der Aussage, ob überhaupt Niederschlag fällt, auf. Dies hängt damit zusammen, dass beide Erhebungen Punktmessungen darstellen, die räumlich bis zu anderthalb Kilometer entfernt sein können. Aufgrund der schnellen Sättigung der Sensoren wird ersichtlich, dass für eine Quantifizierung von Niederschlagsintensitäten zusätzliche Kfz-Sensordaten benötigt werden.

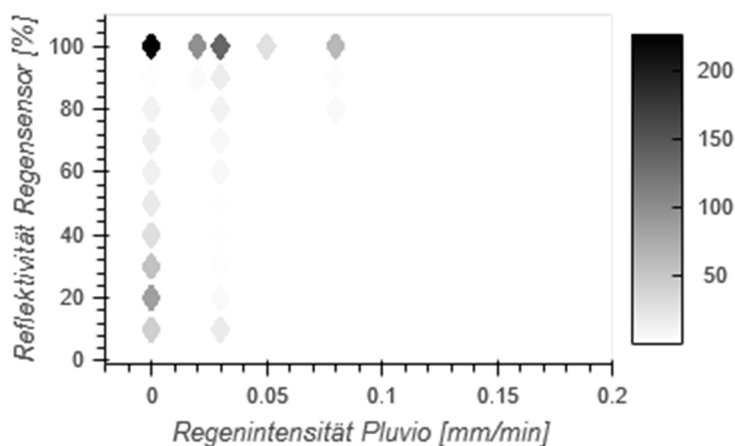


Abbildung 5: Reflektivitäten der Regensensoren und Pluviometerwerte bei einem Niederschlagsereignis der DWD-Kategorie leicht. Die Entfernung des Kfz zum Pluviometer beträgt durchgehend weniger als 1,5 km. Der Farbverlauf stellt die Anzahl der übertragenen Datensätze für ein Fahrzeug dar.

b) Scheibenwischer

Die Scheibenwischerfrequenz in heutigen Fahrzeugen liegt auf unterschiedliche Parameter verteilt vor. Eine automatische Scheibenwischerfrequenz wird in acht Abstufungen in der Einheit Hübe/min angegeben. Bei deaktiviertem Scheibenwischer beträgt die Wischergeschwindigkeit 0 Hübe/min, in den weiteren Abstufungen steigt sie linear von 42 Hübe/min um jeweils drei Hübe/min auf 60 Hübe/min an. Weiterhin ist eine manuelle Wischersteuerung durch den Fahrzeugführer möglich. Das entsprechende Signal wird in diesem Fall zusätzlich zur vom Regensensor vorgeschlagenen Frequenz übermittelt. In der folgenden Abbildung (Abbildung 3) werden der Verlauf des Regensensors sowie der Wischerfrequenz eines Fahrzeugs über einen Zeitraum von 20 Minuten dargestellt.

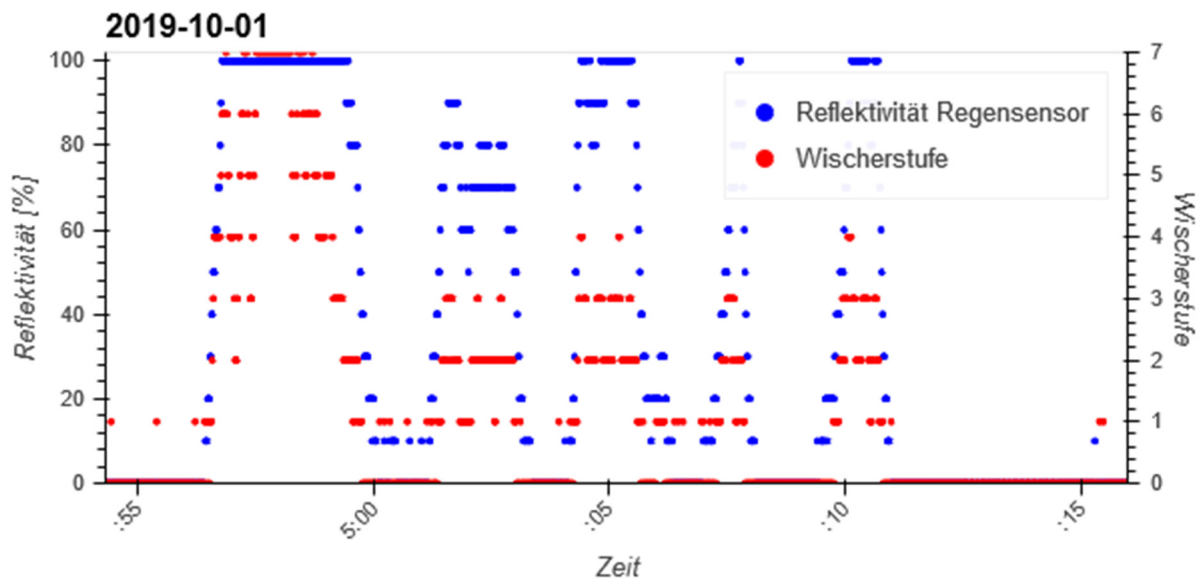


Abbildung 6: Zeitliche Entwicklung der Reflektivität des Regensensors und der Scheibenwischerfrequenz während eines Niederschlagsereignisses über einen Zeitraum von 20 Minuten.

Das Zusammenspiel von Regensensoren und Scheibenwischern weist jeweils einen Zusammenhang zu Niederschlagsereignissen auf: Je höher die vom Niederschlagsradar ermittelte Niederschlagsintensität für die Rasterzelle ist, in dem sich das Auto zu diesem Zeitpunkt befindet, desto höher ist auch die Wischerfrequenz. Unterschiede ergeben sich dadurch, dass der Radarwert nach Umrechnung eine über die Rasterzelle gemittelte Intensität darstellt, während das Fahrzeug räumlich und zeitlich höher aufgelöste Daten zur Verfügung stellt. Weiterhin entsprechen die Kfz-Daten bodennahen Punktmessungen, während Radarreflektivitäten in der Höhe gemessen werden.

c) Temperatursensor

In heutigen Fahrzeugen sind unterschiedliche Temperatursensoren verbaut. Die Betrachtungen in mobile^{VIEW} konzentrieren sich auf den Sensor zur Erfassung der Außentemperatur. Sensoren zur Erfassung der Fahrzeuginnen- oder Frontscheibentemperatur werden vernachlässigt, da kein direkter Zusammenhang zu Niederschlagsereignissen nachgewiesen werden konnte.

Eine Plausibilisierung der erhobenen Daten hat bereits stattgefunden. In der aktuellen Projektphase werden Möglichkeiten zur zusätzlichen Berücksichtigung von Temperaturgradienten in der Detektion von Niederschlagsereignissen erarbeitet. Die folgende Grafik (Abbildung 4) zeigt einen vom Kfz-Sensor gemessenen Temperaturabfall um 2,0 °C bei gleichzeitig steigender Niederschlagsintensität bei einer nur geringen Niederschlagssumme. Das Fahrzeug befindet sich kontinuierlich innerhalb eines Radius von anderthalb Kilometern um das Pluviometer.

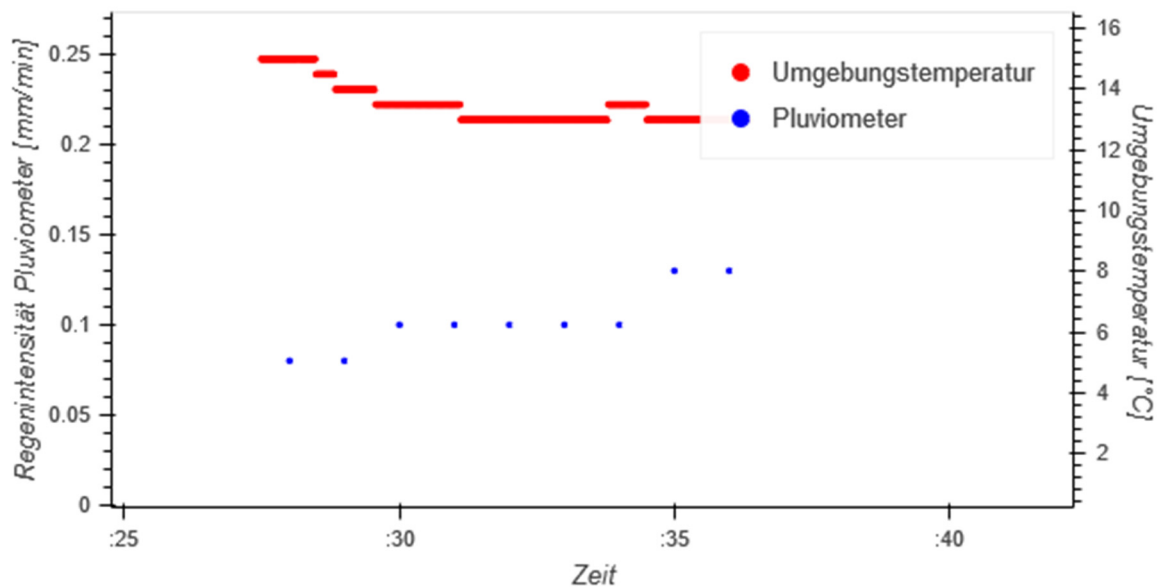


Abbildung 7: Mit dem Kfz-Sensor gemessene Umgebungstemperatur (rot) in der Nähe eines Pluviometers (blau) bei Start eines mäßigen Niederschlagsereignisses, Zeit in [min].

d) Lichtsensor

Das Konsortium beschäftigt sich derzeit intensiv mit der Rohdatenanalyse des Lichtsensors. In jedem Fahrzeug sind Sensoren verbaut, welche die Helligkeit über dem Fahrzeug mit einem Maximalwert von 101.200 Lux misst. Ziel der Vorverarbeitung der Rohdatenanalyse ist es, einen jahres- und tageszeitabhängigen Gradienten des Lichtsensors zu ermitteln, der als Indiz für die Verringerung der Helligkeit bei aufziehender Bewölkung im Vorfeld eines Niederschlagsereignisses verwendet werden kann.

5. Ausblick

Derzeit arbeitet das Konsortium an der Optimierung des Informationsmodells. Dafür werden die eingehenden Rohdaten in geeigneter Weise vorverarbeitet. Im Informationsmodell werden sie anschließend mit Niederschlagsradar- und Pluviometerdaten verschnitten. Das Modell generiert eine kombinierte Niederschlagsintensität, die in Form einer MSPM visualisiert wird. Als finale Verarbeitung erstellt das Konsortium abschließend ein Plausibilisierungskonzept für die MSPM, in dem Routinen zur automatisierten Plausibilitätskontrolle enthalten sind. In diesem Schritt wird untersucht, ob die generierten MSPM zu einer verbesserten Abbildung der realen Niederschlagsbedingungen führen.

Sollte das Plausibilisierungskonzept die Eignung der MSPM als Inputdaten für hydrologische Modelle bestätigen, ist eine Anwendung im Hochwasserinformationssystem auf Basis von Delft-FEWS bei EGLV geplant. An dieser Stelle ermöglichen die Kfz-Daten eine präzisere Verortung von Niederschlagsereignissen, auf deren Basis eine Prognose von Gebietsniederschlägen verbessert werden soll. Die so generierten Niederschlagssummen und darauf aufbauende Abflussvorhersagen können beispielsweise im Warnmanagement, der Verkehrssteuerung und zur Steuerung von wasserwirtschaftlichen Anlagen verwendet werden.

Die Ergebnisse der konkreten Anwendung bei EGLV werden somit Aufschluss über die Eignung von Kfz-Sensordaten für wasserwirtschaftliche Fragestellungen geben. Im Allgemeinen offerieren die in der heutigen Fahrzeuggeneration ohnehin erhobenen Daten gegenüber den Pluviometer- und Niederschlagsradarmessungen zwei Vorteile: Der Transfer des Konzeptes auf einen größeren Maßstab, bspw. die Ausrüstung von Fahrzeugen des ÖPNV mit geeigneter Übertragungstechnik, stellt in Deutschland ein großes Potenzial an mobilen Messstationen dar und bietet somit die Möglichkeit einer hohen räumlichen Verdichtung gegenüber heutigen terrestrischen Stationsdaten. In der hydrologischen Modellierung und bei potenziellen Anwendungen im Nowcasting könnten Kfz-Sensordaten zukünftig eine räumlich und zeitlich hoch aufgelöste weitere Datenquelle darstellen.

Als Forschungsprojekt ist es außerdem ein Ziel von mobile^{VIEW}, die gewonnenen Erkenntnisse der Öffentlichkeit zugänglich zu machen und dazu beizutragen, in der Bevölkerung ein Bewusstsein für die Relevanz von Starkregenereignissen und deren Auswirkungen zu schaffen. Das Projekt bietet ein anschauliches Beispiel dafür, wie im Verkehrsbereich erhobene Daten auch sektorübergreifend für die Wasserwirtschaft nutzbar gemacht werden können, bspw. in Form eines verbesserten lokalen Warnmanagements oder einer vorausschauenden Verkehrssteuerung.

Literatur

- DWA. (2017). Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft (DWA) - Niederschlagserfassung durch Radar und Anwendung in der Wasserwirtschaft. *DWA Themen T2/2017*.
- DWD. (2020). Deutscher Wetterdienst - Wetterlexikon. Retrieved from <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=101812&lv3=101906>
- IPCC. (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 1535 ff.
- Krämer, S., Treis, A., & Pfister, A. (2019). Radarregendaten für die Stadtentwässerung - Welche Güte ist erreichbar? *Korrespondenz Wasserwirtschaft (KW)*, 12/2019, 100-108.
- Pfister, A., Treis, A., & Teichgräber, B. (2015). Der Einsatz von Radardaten für wasserwirtschaftliche Zwecke bei Emscher-Genossenschaft und Lippeverband. *Korrespondenz Wasserwirtschaft (KW)*, 2/2015, 115-124.
- Schellart, A., Wang, L., & Onof, C. (2012). *High Resolution Rainfall Measurement and Analysis in a Small Urban Catchment*. Retrieved from St. Moritz: http://www.raingain.eu/sites/default/files/urbanrain12_schellart.pdf

Multifunktionale Flächennutzung für den Hochwasserschutz am Beispiel des Zoos in Gelsenkirchen

Georg Johann, Bettina Krüsken

Zusammenfassung

Das Emschereinzugsgebiet als dicht besiedelter Raum bietet für die Errichtung großer Hochwasserschutzanlagen wenig Raum. Zur Rückhaltung von Extremereignissen oberhalb der Bemessungsgrenze bieten sich deshalb multifunktionale Flächennutzungen an. Das geplante Hochwasserrückhaltebecken Hüller Bach (im Bereich der Mündung in die Emscher) bietet eine solche Option. Auf der Fläche des Zoos Zoom Erlebniswelt Gelsenkirchen wird ein Retentionsraum die Hochwasserabflüsse in der Emscher reduzieren. In diesem Beitrag wird dargestellt, wie diese Anlage funktioniert und welche Wirkung das Becken auf das Gesamtsystem der Emscher hat. Die Analysen erfolgten mit dem gekoppelten hydrologisch-hydraulischen Modell NASIM-HDR. Diese gekoppelte Betrachtungsweise ermöglicht eine Analyse der Wirkungsweise des Hochwasserrückhaltebeckens nicht nur hinsichtlich der Superposition der Wellen von Haupt- und Nebenlauf und der Reduzierung der Hochwasserwellen in der Emscher, sondern auch hinsichtlich der Art und Dauer der Beckenfüllung. Wichtige Bausteine dieser multifunktionalen Nutzung sind ein Evakuierungsplan für die BesucherInnen, das Zoopersonal und für die Tiere und die Einarbeitung in das Online-Hochwasservorhersagesystem der Emschergenossenschaft.

1. Einleitung

Die Bevölkerungsdichte von ca. 2.700 Einwohnern/km² macht das Emscher-Einzugsgebiet zu einem der dichtesten besiedelten Ballungsräume in Europa. Anfang des 20. Jahrhunderts wurde aus der Emscher, einem gewundenen Tieflandfluss in einer dünn besiedelten Agrarlandschaft, ein begradigtes, vielerorts von Deichen eingefasstes Abflusssystem eines dann urban geprägten Einzugsgebiets. Heute liegt der Bebauungsanteil bei rund 60%. Dieser technische Umbau, der durch Hochwasserschutzsysteme mit hohem Ausbaugrad gekennzeichnet ist, machte den Weg frei für die Entstehung einer der größten Industrieregionen Deutschlands. Dieses Hochwasserschutzsystem wurde auf historische Hochwasserereignisse ausgelegt. Es zeigt damit eine hohe Resilienz für die dominierenden Bedürfnisse der Vergangenheit. Mit dem Klimawandel ändert sich jedoch bereits heute das Niederschlagsregime in seiner Ausprägung (Pfister 2016) und damit die Hochwasserabflüsse. Bei Hochwasserereignissen, die die Kapazität der Hochwasserschutzsysteme überlasten, können sich enorme Schäden ergeben. Unter diesem Gesichtspunkt stellt sich die Frage nach den zukünftigen Anforderungen an ein resilientes Hochwasserrisikomanagement.

Die Emschergenossenschaft entwickelt Minderungs- und Anpassungsstrategien, um den Folgen des Klimawandels zu begegnen. Hierzu gehören die dezentralen Retentionsmaßnahmen im Einzugsgebiet, die in der Initiative „Wasser in der Stadt von Morgen“ (Becker et. al, 2018) vorangetrieben werden. Auch die naturnahe Umgestaltung der technisch ausgebauten Fließgewässer sorgt für eine nennenswerte Dämpfung der Hochwasserspitzen (Johann & Frings, 2016). Darüber hinaus werden, wo Platz vorhanden ist, neue Hochwasserrückhaltebecken angelegt, zum Beispiel das HRB-Verbundsystem Dortmund-Mengede und -Ellinghausen mit 1,75 Mio. m³ (Krüger et. al, 2019). Nicht zuletzt wird auch die Möglichkeit der multifunktionalen Flächennutzung, um zusätzlichen Retentionsraum bereitzustellen, genutzt. Ein Beispiel hierfür ist die Afrikawelt des Zoos ZOOM in Gelsenkirchen (Abbildung 1), dessen Planung, Funktion und Wirkung im Folgenden vorgestellt wird.



Abb. 1: Teil der Afrikawelt des Zoos ZOOM-Erlebniswelt in Gelsenkirchen, der auch als Hochwasserretentionsraum von der Emschergenossenschaft genutzt wird (Quelle: ZOOM-Erlebniswelt)

2. Das Hochwasserrückhaltebecken im Zoo ZOOM Erlebniswelt Gelsenkirchen

Das geplante Hochwasserrückhaltebecken im Zoo ZOOM Erlebniswelt Gelsenkirchen liegt im Mündungsbereich des Hüller Baches in die Emscher (Abbildung 2). Von dort aus fließt die Emscher in Deichlage (dimensioniert auf ein HQ_{200}) noch rund 34 km Flusskilometer durch dicht bebautes Gebiet dem Rhein zu. Mit einem Einzugsgebiet von 78,5 km² ist der Hüller Bach der größte Nebenlauf der Emscher. Beim Zufluss des Hüller Baches hat die Emscher ein Einzugsgebiet von 400 km² (von insgesamt 865 km²). Mit seiner Lage im Mittellauf der Emscher beeinflusst der Hüller Bach das Hochwassergeschehen in der Emscher maßgeblich. Aus diesem Grund sind Maßnahmen zum Hochwasserschutz der Emscher im Zusammenhang mit dem Abflussgeschehen des Hüller Baches eng verbunden.

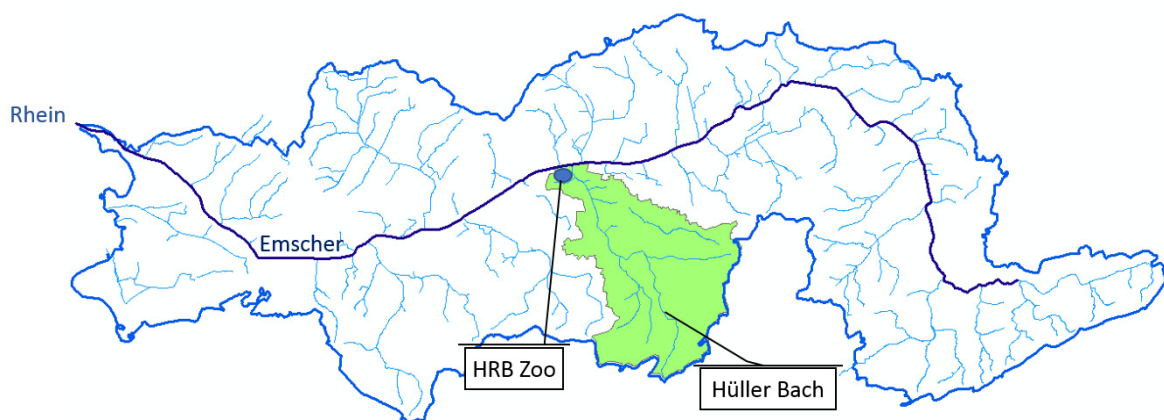


Abb. 2: Einzugsgebiete Emscher und Hüller Bach inkl. Lage des HRB Zoom Erlebniswelt Gelsenkirchen

Der Retentionsraum im Zoo wird ab einem HQ_{25} im Hüller Bach geflutet, somit wird die Auslastung der Emscher-Deiche flussabwärts reduziert. Dies ist besonders bei Ereignissen relevant, in denen sich die Hochwasserwellen von Emscher und Hüller Bach überlagern.

Der Hüller Bach fließt von Süden kommend auf die Emscher zu. Südlich der Emscher verläuft der Schifffahrtskanal Rhein-Herne-Kanal, unter den der Hüller Bach gedükert wird, bevor dieser in die Emscher mündet. Oberhalb des Dückers liegt westlich der Retentionsraum im Zoo (Abbildung 3). Um das Wasser vom Hüller Bach in die Zoofläche hinein zu bekommen, ist vor dem Düker ein Drosselbauwerk mit einer Leistungsfähigkeit von $45 \text{ m}^3/\text{s}$ (HQ_{25} Hüller Bach) geplant. Ab diesem Hochwasserabfluss im Hüller Bach findet ein Rückstau statt. Über eine Überlaufschwelle fließt dann das im Hüller Bach sich aufstauende Wasser unter Berücksichtigung entsprechender Sicherheitsvorkehrungen (s. Kap. 5) in den Zoo, das dann nach der Hochwasserwelle durch einen Grundablass wieder in den Hüller Bach zurückfließt. Das Volumen beträgt 167.000 m^3 .



Abb. 3: Luftbildaufnahme des HRB Zoom Erlebniswelt Gelsenkirchen (rot umrandet), Hüller Bach (im Vordergrund) und Wasserschifffahrtskanal (rechts) (Quelle: EG)

3. Methodik

Die ursprünglichen Planungen für die Genehmigung der Hochwasserschutzanlage wurden mit dem hydrologischen Modell NASIM und dem 1-D-stationären Hydraulikmodell Jabron (Hydrotec, 2005) erstellt. Mit der NASIM-Version 4.7.2 (NASIM-HDR) steht nun ein hydrologisches Modell zur Verfügung, welches den Abfluss in einzelnen Systemelementen hydrodynamisch über den Ansatz der diffusen Welle berechnen kann (Hydrotec, 2018). Damit können komplexe Fließvorgänge besser abgebildet werden. Durch den hohen Versiegelungsgrad in den Einzugsgebieten des Emschersystems entstehen schnell ansteigende Hochwasserwellen. Die Superposition von Wellen und auch das Rückstauverhalten aus der Emscher in die Nebenläufe ist häufig unklar. Das Hochwasserrückhaltebecken befindet sich im Mündungsbereich des Hüller Bachs in die Emscher. Durch die Anwendung von NASIM-HDR soll der Einfluss dieser Faktoren auf die Bemessung überprüft werden. Im Modell wird der Hüller Bach von der Mündung bis km 3,25 hydrodynamisch abgebildet und auch die Elemente der Emscher

werden 2,5 km oberhalb und 3 km unterhalb hydrodynamisch berechnet. Die restlichen Gewässerelemente werden weiterhin hydrologisch berechnet. Bei den Bemessungsrechnungen werden in der Regel für die Ermittlung der Wellen von Bemessungsereignissen entweder real abgelaufene Ereignisse auf einen bestimmten Abfluss hochskaliert oder über Modellregenberechnungen synthetische Wellen mit extrapolierten Spitzenabflüssen für seltene Jährlichkeiten erzeugt. Diese Vorgehensweise wurde auch bei den Planungen des HRB angewandt. Das HRB wurde auf ein HQ_{100} (BHQ_3) bemessen.

Für die Nachrechnung mit NASIM-HDR stand zusätzlich ein real abgelaufenes, großflächiges Hochwasserereignis zur Verfügung. Es handelt sich um das Extremereignis vom August 2010 im westlichen Münsterland. Bei diesem Ereignis fielen vom 1.8. bis 27.8.2010 flächendeckend rd. 250 mm Niederschlag, wobei am 26. und 27.8.2010 innerhalb von 24 Stunden rd. 140 mm Niederschlag fielen. Die Jährlichkeit des Ereignisses lag weit über 100 Jahre. Nach KOSTRA (DWD, 2017) liegt der 100-jährliche Niederschlag mit einer Dauerstufe von 30 Stunden bei 90 mm. Dieses Ereignis wurde in seiner Lage nach Süden auf des Emschergebiet verschoben und insbesondere der Zeitraum Ende August 2010 für die weiteren Berechnungen verwendet. Die Niederschlagszelle sorgt mit ihrer Größe für die Überregnung des gesamten Emschereinzugsgebietes. Zur Abbildung der unterschiedlichen Jährlichkeiten wurde der Niederschlagsinput mit Faktoren versehen, um bestimmte Jährlichkeiten im Abfluss zu erreichen. Das Ereignis in seiner vollen Ausprägung hätte auch im Emschergebiet zu katastrophalen Überschwemmungen geführt.

4. Ergebnisse

4.1 Wechselwirkung Emscher – Hüller Bach

Das Überlagerungsverhalten der Hochwasserscheitel zwischen Hüller Bach und Emscher wurde auf Basis einer Langzeitsimulation von 1950 bis 2019 untersucht, mit dem Ergebnis, dass die Scheitel großer Ereignisse, wie in der Langzeitsimulation berechnet wurden, nicht aufeinandertreffen. Im Falle des untersuchten Extremereignisses mit einer großflächigen Überregnung mit dem Ereignis 2010 (siehe oben) zeigt sich ein ganz anderes Bild. Bei einem Szenario ohne HRB, zeigt Abbildung 4 links ein zeitgleiches Aufeinandertreffen der Hochwasserscheitel. Rechts ist die gedrosselte Ganglinie mit HRB dargestellt und gleichzeitig die deutliche Wirkung auf den Abfluss in der Emscher. Die dargestellte Ganglinie des Hüller Bachs entspricht einem HQ_{100} (Bemessungsabfluss). Das Niederschlagsereignis August 2010 musste hierfür um 30 % reduziert werden. Der Scheitelabfluss der Emscher wird, bezogen auf die statistischen Werte des aktuellen Zustands, durch die Retention im HRB von einem HQ_{200} auf ein HQ_{50} reduziert. Die reduzierende Wirkung des HRBs auf den Scheitelabfluss der Emscher nimmt bis zur rd. 34 km entfernt liegenden Mündung weiter ab, da noch drei bedeutende Nebenläufe das Abflussgeschehen prägen.

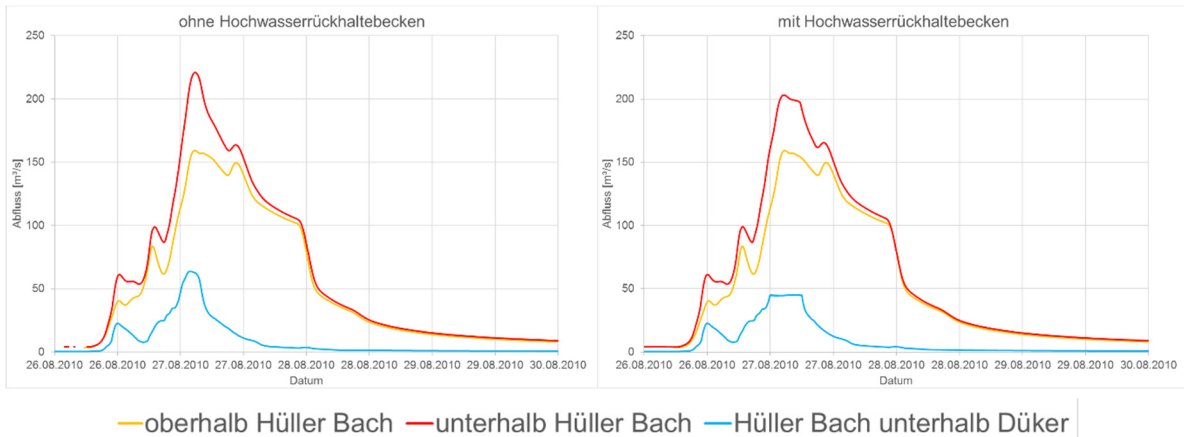


Abb. 4: Überlagerungsverhalten von Emscher und Hüller Bach ohne (links) und mit (rechts) Hochwasserrückhaltung.

Eine Umkehr der Fließrichtung, also ein Rückstau der Emscher in den Hüller Bach, ist in den Ergebnissen der Modellberechnungen als negativer Abfluss erkennbar. Dies zeigt sich in den Berechnungen nicht, d.h. es findet keine Fließrichtungsumkehr im Unterlauf des Hüller Bachs statt. Der Hochwasserstand der Emscher hat auf die Hochwasserwelle im Hüller Bach oberhalb des Drosselbauwerkes keinen nennenswerten Einfluss (Tabelle 1). Der Einfluss auf den Wasserstand oberhalb des Drosselbauwerkes ist ebenfalls nicht erkennbar. Der Wasserstand unterhalb des Drosselbauwerkes erhöht sich in Abhängigkeit der Jährlichkeit in der Emscher, jedoch unterscheiden sich die Einstauvolumina ebenfalls nur minimal bei den unterschiedlichen Unterwasserrandbedingungen (Tabelle 1).

Tab. 1: Vergleich des Einflusses des Emscherwasserstandes auf die Funktion des HRB

		HQ ₁₀₀ Hüller Bach/ HQ ₅₀ Emscher	HQ ₁₀₀ Hüller Bach/ HQ ₁₀₀ Emscher	HQ ₁₀₀ Hüller Bach/ HQ ₂₀₀ Emscher
max. Q oberhalb Drossel	[m ³ /s]	61,3	61,4	61,4
max. Q unterhalb Drossel		45,2	45,2	45,1
max. WSP Emscher	[mNN]	37,76	37,99	38,18
max. WSP oberhalb Drossel		40,54	40,54	40,54
max. WSP unterhalb Drossel		38,56	38,67	38,77
Einstauvolumen	[m ³]	113.092	114.170	115.253

Selbst extreme Abflüsse in der Emscher führen lediglich zu einem Wasserstandsanstieg unterhalb des Drosselbauwerkes, das Einstauvolumen im HRB erhöht sich nur geringfügig.

4.2 Füllung des Rückhaltereaumes

Die Füllung des Hochwasserrückhaltebeckens auf dem Gelände des Zoos lässt sich mit NASIM-HDR detailliert untersuchen. Die modellierte HQ₁₀₀-Welle im Hüller Bach führt zu einem maximalen Einstauvolumen von rd. 115.000 m³. Das maximal vorhandene Volumen wird also nicht erreicht, Abbildung 5 zeigt den Ablauf der Füllung des HRB. Eine Vollfüllung des

HRB würde bei diesem Ereignis bei einem Scheitelabfluss von rd. $65 \text{ m}^3/\text{s}$ erreicht werden, was ungefähr einem HQ_{150} entspricht.

NASIM-HDR bietet durch zahlreiche Ergebniszeitreihen eine detaillierte Analyse der hydrologischen und hydraulischen Prozesse. Abbildung 5 zeigt beispielhaft neben den Abflüssen im Hüller Bach und dem Zufluss zum HRB auch die Wasserspiegelveränderungen im Gewässer und im Retentionsraum.

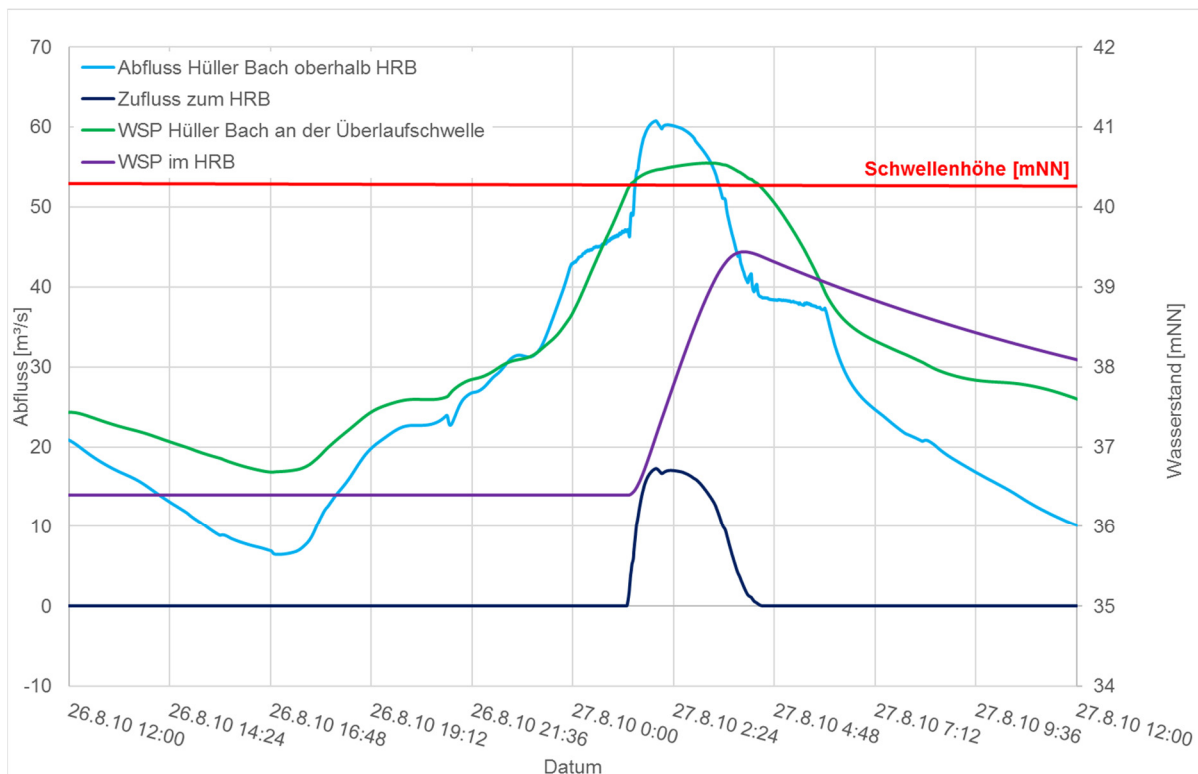


Abb. 5: Hydrodynamische Modellierung des Füllverhaltens des HRB

5. Betrieb des Hochwasserrückhaltebeckens

Das Hochwasserrückhaltebecken liegt auf einer ehemaligen Fläche der Emschergenossenschaft, die an den Zoo verkauft wurde. Bei Hochwasser werden so im Ereignisfall Flächen Dritter geflutet. Diese Konstellation bedarf besonderer Regelungen im Übungs- und Ereignisfall und ist dennoch vorbildlich für eine derartige multifunktionale Nutzung.

Bevor das Hochwasserrückhaltebecken gefüllt werden kann, müssen die Besucher und die Tiere evakuiert werden. Auch muss der Bereich hochwassersicher gemacht werden. Um dies zeitgerecht abarbeiten zu können, wurde zusammen mit dem Zoo ein Evakuierungsplan erarbeitet, der auf der Hochwasservorhersage der Emschergenossenschaft aufbaut. Die erforderlichen Räumungs- und Sicherungsmaßnahmen des Zoos benötigen im optimalen Fall ca. 5 Stunden. Der Start der Evakuierung kann nicht an Pegelwerte geknüpft werden, da zum einen die Konzentrationszeit des dicht bebauten von schnellem Oberflächenabfluss dominierten Einzugsgebietes zu kurz ist. Dies zeigt auch Abbildung 5, der Scheitelanstieg dauert im gezeigten Beispiel 8 Stunden, die Füllung des HRB ca. 3 Stunden. Zum anderen lassen die Pegelwerte keine Rückschlüsse zu, ob und wann die Überlaufschwelle zum Zoo überströmt wird.

Mit dem bei der Emschergenossenschaft betriebenen Hochwasservorhersagesystem werden online Niederschlagsabflusssimulationen mit terrestrisch und radargemessenen Niederschlägen inkl. DWD-Niederschlagsvorhersagen durchgeführt (Johann et al., 2017). Das System bietet die Möglichkeit schwellwertabhängiger automatisierter Warnungen per SMS oder E-Mail, die von den diensthabenden HydrologInnen ausgelöst werden. In dieses System werden auch die MitarbeiterInnen des Zoos integriert.

6 Fazit

Die Planung und Wirkungsanalyse von Hochwasserretentionsräumen, die für seltene Ereignisse ausgelegt sind, stellt eine Herausforderung dar. Besonders, wenn zur Ermittlung von extremen Hochwasserabflüssen noch die Superposition im Gewässersystem hinzukommt. So war in diesem Fallbeispiel in der Langzeitsimulation von 69 Jahren ein Zusammentreffen der Hochwasserwellen von Emscher und Hüller Bach nicht zu sehen - bei der Übertragung eines 150 km entfernten extremen Niederschlagsereignisses auf das Untersuchungsgebiet aber schon. Deshalb sollten solche Vorhaben immer mit weiteren Methoden als der hydrologischen Langzeitsimulation geplant werden.

Eine hydrologisch-hydraulische instationäre Herangehensweise, wie in diesem Beispiel, führt zu einer effizienten Planungsgrundlage, da beide Prozesse gemeinsam dargestellt und in ihrer Wechselwirkung direkt analysiert werden können.

Die Wirkung des HRB in der Zoom Erlebniswelt Gelsenkirchen für Ereignisse über BHQ erhöht die Resilienz in Zeiten des Klimawandels mit zunehmenden Extremereignissen. Für solche heute und erst recht in Zukunft notwendige Maßnahmen ist es ein guter Weg, die multifunktionale Nutzung von Flächen voranzutreiben, um die notwendigen Retentionsvolumina bereitstellen zu können.

Literatur

- Becker, M., Schumacher, R. & Siekmann, M. (2018): Zukunftsinitiative „Wasser in der Stadt von morgen“ - ein kooperationsorientierter Ansatz zur Verbesserung des Stadtklimas, in: Essener Tagung 2018.
- DWD (2017): KOSTRA-DWD-2010R, Revision des KOSTRA-DWD-2010-Datensatzes, Starkniederschlagshöhen für Deutschland (1951-2010), Abschlussbericht. Deutscher Wetterdienst – Hydrometeorologie, Offenbach, www.dwd.de
- Johann, G., Pfister, A. & Teichgräber, B. (2017): Hochwasservorhersage für die Deichverteidigung im Emscher- und Lippegebiet, in: Korrespondenz Wasserwirtschaft 10/17, S, 641,
- Johann, G. & Frings, H. (2016): Hochwasserrisiko mindern und Ziele des Gewässerschutzes erreichen - geht das? Ein Praxisbeispiel: die ökologische Verbesserung des Gewässersystems der Emscher, in: 39, Dresdner Wasserbaukolloquium 2016.
- Hydrotec (2005): NASIM 3.4.1 Benutzerdokumentation, Aachen.
- Hydrotec (2018): NASIM 4.7.2 Benutzerdokumentation, Aachen.
- Krüger, M., Johann, G., Semrau, M. und Bockholt, T. (2019): Von der Planung bis zur Umsetzung eines Hochwasserrückhaltebecken-Verbundsystems – baubetriebliche, ökologische und hydraulische Aspekte, in: Wasserwirtschaft 5/2019 S, 54.

Pfister, A. (2016): Langjährige Entwicklung von Starkregen – Handlungsempfehlungen für die Zukunft, in: Essener Tagung 2016.

Sulfat in der Spree: Gefährdung, Bewirtschaftung, Prognosen

Michael Kaltofen, Jens Burgschweiger, Benjamin Creutzfeldt, Jörg Walther, Katja Eulitz,
Björn Fischer, Oliver von Hoegen, Julia Krause

Zusammenfassung

Von den Berliner Wasserbetrieben liegt eine Szenarioanalyse der Sulfatbelastung für das Wasserwerk Friedrichshagen vor. Um zu einer begründeten Einschätzung der Gefährdung der Trinkwasserversorgung unter Berücksichtigung der Möglichkeiten und Grenzen der sulfatorientierten Mengenbewirtschaftung im Spreegebiet zu gelangen, wurden die prognostischen Risiken in der nahen Zukunft für die Überschreitung von Immissionsrichtwerten an den relevanten Querschnitten der Spree bestimmt. Die Steuerung auf einen Immissionsrichtwert von 450 mg/L Sulfat für Spremberg-Wilhelmsthal gelingt demnach nicht vollständig. Die 90 %-Perzentile der Pegel Neubrück und Rahnsdorf liegen über den Immissionsrichtwerten. Das wasserwirtschaftliche Steuerungspotenzial zu einer weiteren Verdünnung der Sulfatfrachten des Bergbaus reicht nicht aus. Mögliche Steueroptionen unterhalb Spremberg-Wilhelmsthal könnten zusätzliche Effekte auf die untere Spree und die Dahme aufweisen.

1. Gefährdung der Sicherheit der Trinkwasserversorgung

Die Berliner Wasserbetriebe betreiben am Müggelsee das WW Friedrichshagen, das zur Trinkwassergewinnung neben dem Grundwasser aus dem unmittelbaren Einzugsgebiet auch Uferfiltrat aus Spree und Dahme nutzt. Im Trinkwasser müssen die Berliner Wasserbetriebe für Sulfat einen Grenzwert von 250 mg/L einhalten (TrinkwV 2001). Die Spree weist oft höhere Sulfatkonzentrationen auf, wie exemplarisch die folgende Abbildung 1 in Bezug auf den Querschnitt Beeskow/Spree, ca. 70 Flusskilometer oberhalb des Müggelsees gelegen, für Juni bis einschließlich September 2018 zeigt (DHI WASY, 2019).

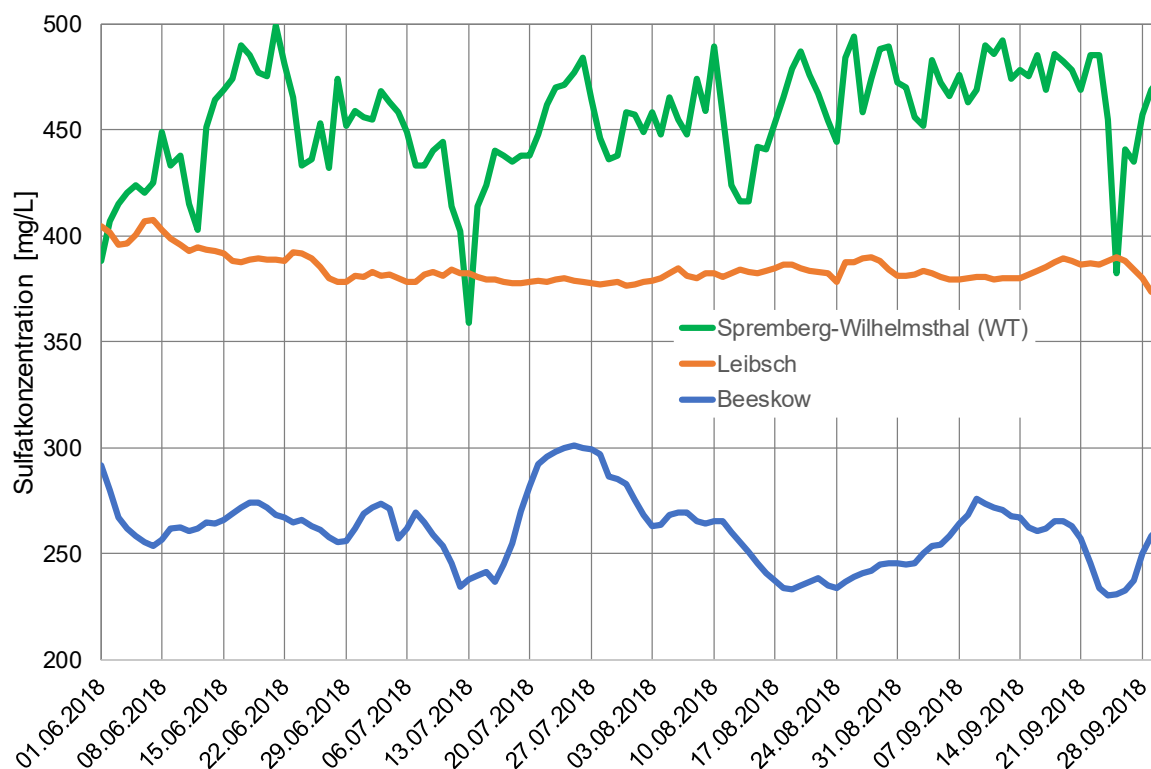


Abb. 1: Sulfatkonzentrationen an verschiedenen Querschnitten der Spree [mg/L], berechnet aus gemessenen Werten der Leitfähigkeit (Datenquelle: LMBV, LfU).

Die natürliche Konzentration in der Spree liegt bei ca. 70 mg/L. Die hohen Sulfatfrachten der Spree gehen zum größten Teil auf die Grubenwassereinleitungen aus dem aktiven Bergbau des Lausitzer Reviers zurück. Hinzu kommen diffuse Sulfatmissionen in die Vorflut und Ausleitungen aus Tagebaufolgeseen des ehemaligen Braunkohletagebaus.

Durch die Berliner Wasserbetriebe wurden Szenarioanalysen der Mischungsbilanz für den Anteil des Uferfiltrats und den Anteil des natürlich gebildeten Grundwassers durchgeführt (BWB, 2019). Darin wird geschlussfolgert, dass „maximal 10 % der Messwerte ... einen Wert von 250 mg/L überschreiten“ dürfen. Bei einer Konzentration in der Müggelspree in Höhe von 300 mg/L im Jahresmittel kann der Trinkwassergrenzwert ohne Fördereinschränkungen nicht mehr eingehalten werden und es müssten Ausgleichskapazitäten an anderen Standorten geschaffen werden. Bei einer Sulfatkonzentration in der Müggelspree von 400 mg/L im Jahresmittel wäre die Fortsetzung der Trinkwasserversorgung nur mit einer zusätzlichen Verfahrensstufe zur Sulfatabtrennung im Wasserwerk Friedrichshagen möglich. Genaue Angaben zur Realisierbarkeit und zu den Kosten wären erst nach einer detaillierten Planung unter Berücksichtigung aller lokalen Randbedingungen möglich.

2. Sulfatorientierte Mengewirtschaftung im Spreegebiet

Die Länder Sachsen, Brandenburg und Berlin koordinieren seit Jahrzehnten die Bewirtschaftung der durch den Sanierungs- und aktiven Bergbau beeinflussten Spree. Dazu legt die gemeinsame Arbeitsgruppe Flussgebietsbewirtschaftung entsprechende Grundsätze fest (AG FGB, 2019). Darin sind Richtwerte für Sulfat als 90 %-Perzentile für maßgebliche Querschnitte der Spree festgelegt:

- Spremberg-Wilhelmsthal 450 mg/L,
- Leibsch UP 300 mg/L,
- Neubrück 280 mg/L,
- Rahnsdorf 220 mg/L.

Zur Einhaltung dieser Immissionsrichtwerte werden insbesondere Abgaben aus den sächsischen Talsperren (TS) genutzt:

- TS Bautzen mit einem Betriebsraum von 24,2 Mio. m³,
- TS Quitzdorf mit einem Betriebsraum von 9,3 Mio. m³,
- SB Lohsa I mit einem Betriebsraum von 2,8 Mio. m³.

Aus dem Gesamtbetriebsraum von 36,3 Mio. m³ werden gegenwärtig pro Jahr 20 Mio. m³ für die Niedrigwasseraufhöhung und Sulfatverdünnung in Brandenburg und Berlin vorgehalten. Darüber hinaus wird das Speicherbecken Bärwalde (bis zu 19 Mio. m³ Betriebsraum) in Verantwortung der Lausitzer und Mitteldeutschen Bergbauverwaltungs-gesellschaft (LMBV) zur Sulfatverdünnung eingesetzt. Zukünftig wird das Wasserspeichersystem (WSS) Lohsa II in die Speicherbewirtschaftung einbezogen werden. Es soll über einen Gesamtbetriebsraum von ca. 70 Mio. m³ verfügen. Das WSS Lohsa II als Tagebaufolgeseesee kann an seinem Ablauf Sulfatkonzentrationen aufweisen, die über dem Immissionsrichtwert für Spremberg-Wilhelmsthal von 450 mg/L liegen. Diese Sulfatkonzentrationen ergeben sich aus einem komplexen Wechselwirken von Grundwasserzu- und -abstrom, Abgabe von Speicherwasser sowie Durchleitung von Spreewasser.

Zukünftig wird auch die Überleitung von Neiwasser mit bis zu 2 m³/s in der Spree sulfatverdünnend wirken, wenn diese für die Flutung und Nachsorge der Tagebaufolgeseen der Lausitzer Seenkette im Schwarze Elster-Gebiet herangezogen wird.

In Bezug auf die sich daraus ergebenden komplexen Wirkungszusammenhänge hat die länderübergreifende Arbeitsgruppe Flussgebietsbewirtschaftung grundsätzlich geregelt, wie Steueroptionen eingesetzt werden. Darüber hinaus wurde durch die Fachbehörden der genannten Bundesländer für die vorliegenden Untersuchungen die wahrscheinlichste, zukünftig zu erwartende Entwicklung hinsichtlich der verfügbaren Steueroptionen im Spreegebiet abgestimmt. Die wichtigsten Optionen zeigt Tabelle 1.

Tab. 1: Steueroptionen im Spreegebiet.

Steueroption	Bewirtschaftungsregel
SB Bärwalde	1. Priorität für Sulfatverdünnung
TS Bautzen und Quitzdorf	2. Priorität
Neieüberleitung	Flutung/Nachsorge der Lausitzer Seenkette
WSS Lohsa II	Abgabekapazität 7 m ³ /s Durchleitung aus Haupt- und Kleiner Spree
Cottbuser Ostsee	Mengenbewirtschaftung auf 62,5 m NHN (\pm 0,5 m) Mindestabgabe Fischaufstieg 0,3 m ³ /s

3. Prognosen des Risikos für die Überschreitung von Immissionsrichtwerten

Das Ausmaß der Sulfatmissionen kann für die Trinkwassergewinnung zu kritischen Sulfatkonzentrationen führen (vgl. Abbildung 1 und BWB, 2019). Prognostische Berechnungen mit dem länderübergreifend maßgebenden Planungs- und Entscheidungsinstrument der Bewirtschaftung der Flussgebiete Spree, Schwarze Elster und Neie (WBalMo-Ländermodell) zeigten, dass oberhalb Spremberg-Wilhelmsthal jährlich ca. 100 Mio. m³ Wasser mit einer Sulfatkonzentration von 70 mg/L (entspricht natürlicher Hintergrundkonzentration) zusätzlich zu den bestehenden Betriebsräumen vorgehalten werden müssten, um in Neubrück den Immissionsrichtwert von 280 mg/L als 90 %-Perzentil einzuhalten. Aus den sächsischen Talsperren stehen im Vergleich lediglich 20 Mio. m³ für die Sulfatverdünnung bereit. Außerdem sind hohe Sulfatkonzentrationen eng an aus andauerndem Trockenwetter resultierende Niedrigwassersituationen gebunden. Daher ist methodisch eine Risikoanalyse geboten, die mit dem WBalMo-Ländermodell möglich ist. Es enthält sowohl die Vielfalt der Abflusssituationen wie auch die Steueroptionen und Sulfatmissionen.

Die Modellrechnungen ergaben für die bestehenden Immissionsrichtwerte die in Tabelle 2 gezeigten prognostischen Sulfatkonzentrationen als 90 %-Perzentil.

Tab. 2: Prognostische Sulfatkonzentrationen als 90 %-Perzentil an maßgeblichen Querschnitten der Spree sowie deren Immissionsrichtwerte.

Querschnitt	Immissionsrichtwert	90 %-Perzentil
Spremberg-Wilhelmsthal	450 mg/L	450 mg/L
Leibsch UP	300 mg/L	398 mg/L
Neubrück	280 mg/L	307 mg/L
Rahnsdorf	220 mg/L	268 mg/L

Ein Immissionsrichtwert von 450 mg/L Sulfat für Spremberg-Wilhelmsthal kann demnach häufig, aber nicht dauerhaft sichern, dass die 90 %-Perzentile der Sulfatkonzentrationen in Neubrück und Rahnsdorf unter den Immissionsrichtwerten liegen. Für Rahnsdorf, den Zufluss zum Müggelsee, wird der von den Berliner Wasserbetrieben angestrebte Wert von 250 mg/L zwar überschritten, liegt aber deutlich unter 300 mg/L für den Jahresmittelwert, für den Kosten für die Schaffung und den Betrieb von Ausgleichskapazitäten an anderen Standorten entstehen würden. Es sei ergänzt, dass der Querschnitt Neubrück für das Wasserwerk Briesen maßgeblich ist. Zum Zeitpunkt dieser Untersuchungen lag dafür jedoch keine Gefährdungsanalyse vor. Ausgehend von diesen Ergebnissen ist von Interesse, ob durch eine Absenkung des Immissionsrichtwertes für Spremberg-Wilhelmsthal eine Verbesserung der Sulfatkonzentration an den Querschnitten Neubrück und Rahnsdorf möglich ist. Abbildung 2 zeigt, wie sich die 90 %-Perzentile an den maßgeblichen Querschnitten verändern, wenn der Immissionsrichtwert für Spremberg-Wilhelmsthal verändert wird.

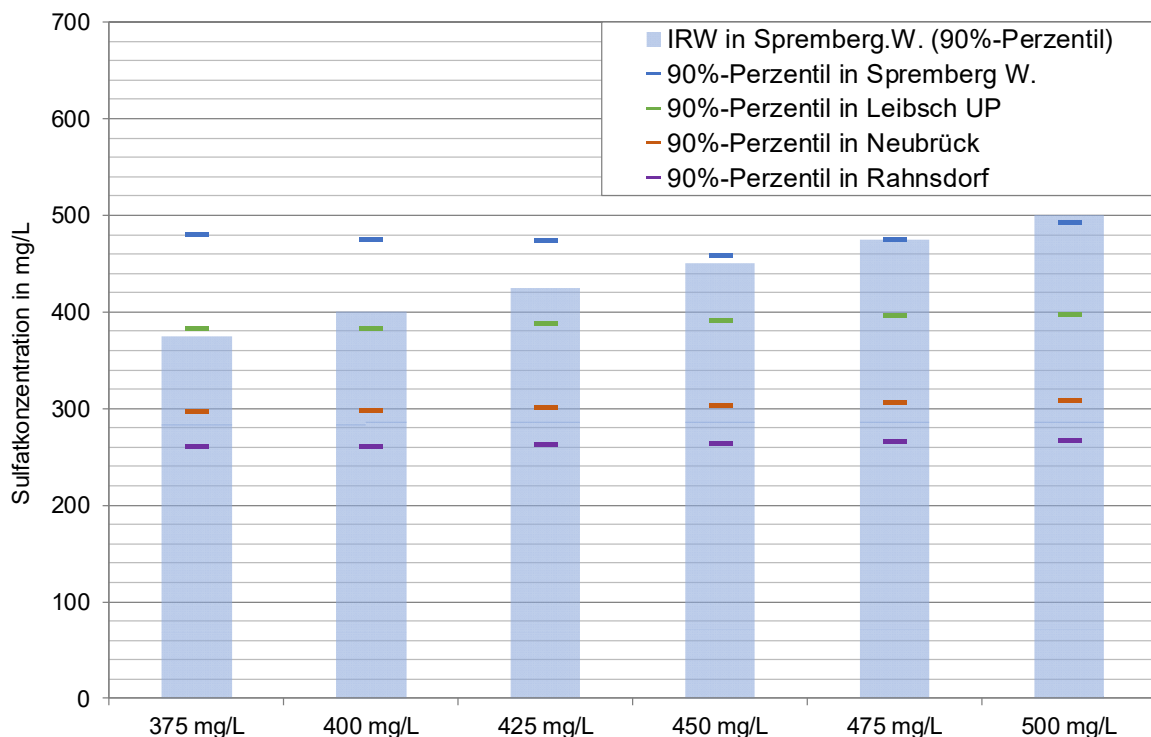


Abb. 2: Veränderung der prognostischen Sulfatkonzentrationen als 90 %-Perzentil an maßgeblichen Querschnitten der Spree für verschiedene Immissionsrichtwerte in Bezug auf Spremberg-Wilhelmsthal.

Die Veränderungen des 90 %-Perzentils an den Querschnitten Neubrück und Rahnsdorf sind sehr gering im Vergleich zur Veränderung des Immissionsrichtwertes Spremberg-Wilhelmsthal. Das 90 %-Perzentil für Leibsch UP und Spremberg-Wilhelmsthal kann sogar ansteigen, wenn der Immissionsrichtwert für Spremberg-Wilhelmsthal verringert wird. Der frühzeitige Ver-

brauch des Speicherwassers zur Sulfatverdünnung führt in diesen Fällen oft zu höheren Sulfatkonzentrationen im weiteren Verlauf des Jahres, wenn die Wasserressourcen aufgebraucht sind.

Die in Abbildung 2 gezeigten Ergebnisse legen nahe, dass die Effizienz der Steuerung auf den Querschnitt Spremberg-Wilhelmsthal – mit den als vorhanden angenommenen zukünftigen Steuerungsmöglichkeiten – gering ist. Die angestrebten Immissionsrichtwerte am Pegel Spremberg-Wilhelmsthal können für das 90 %-Perzentil mit den vorgegebenen Sulfateinträgen aus dem aktiven Bergbau nicht eingehalten werden. Das begrenzte wasserwirtschaftliche Steuerungspotenzial wird auch durch die Messungen z. B. des Jahres 2018 gestützt (Abbildung 1): Der Verlauf der Sulfatkonzentration am Querschnitt Leibsch UP und Beeskow weist kaum relevante Beziehungen zu den Schwankungen der Sulfatkonzentration am Querschnitt Spremberg-Wilhelmsthal auf. Dies führt zu der Empfehlung, vor allem zusätzliche dargebotsausgleichende Maßnahmen und Steueroptionen im aktiven Bergbau und außerdem wasserwirtschaftliche Maßnahmen unterhalb Spremberg-Wilhelmsthal zu prüfen. Letztere Überlegungen sind nicht neu und deshalb bereits im WBaIMo-Ländermodell weitgehend vorbereitet. Dazu gehören ein angepasstes Niedrigwassermanagement des Spreewaldes, um die mengenmäßigen Verluste zu reduzieren (z.B. verlustarme, sulfatneutrale Überleitung in die Untere Spree über den Nordumfluter des Oberspreewaldes). Weiterhin kann der Dahme-Umflut-Kanal unterhalb des Spreewaldes zur Verteilung der Sulfatfracht auf Spree und Dahme genutzt werden. Dafür könnte genau so viel Sulfatfracht aus der Spree entnommen werden, dass die Dahme einen festgelegten Immissionsrichtwert nicht überschreitet. Dafür ist die Berücksichtigung der Durchflussprognose des Zwischengebietes Leibsch/Beeskow und die hydrologische Situation des Dahmeinzugsgebietes von Bedeutung. Dieses Zwischengebiet kann maßgeblich die Sulfatkonzentrationen in Neubrück und Rahnsdorf beeinflussen. Dies zeigen sowohl die Messungen (Abbildung 1) als auch die prognostischen Sulfatkonzentrationen (Abbildung 2), für die sich eine unterschiedliche Dynamik der Sulfatkonzentrationen oberhalb und unterhalb Leibsch UP ergeben hat.

In dieser Studie wurden noch nicht die Auswirkungen des Klimawandels sowie der Braunkohleausstieg berücksichtigt. Die Quantifizierung zukünftiger Wasserdargebote und -nutzungen sowie Sulfatkonzentrationen unter den sich ändernden Rand- und Rahmenbedingungen wie Braunkohleausstieg, Grundwasserwiederanstieg, Veränderung der Grundwasserneubildung infolge des Klimawandels, Zunahme der Verdunstung durch Zunahme der Wasserflächen, insbesondere auch während Trockenperioden, ist notwendig, um die entsprechenden Maßnahmen bewerten zu können. Darüber hinaus ist die Wirkungsweise des Spreewaldes und des Unteren Spreegebietes mit dem Schwielochsee und Neuendorfer See auf den Sulfattransport noch nicht vollständig verstanden. Diese weiterführenden Aspekte sind dann auch im WBaIMo-Ländermodell abzubilden.

Die dargestellten Untersuchungen wurden durch das Landesamt für Umwelt Brandenburg, die Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin, das Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Energie des Landes Brandenburg sowie das Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe des Landes Brandenburg finanziert.

Literatur

- AG FGB, 2019: Grundsätze für die Länder übergreifende Bewirtschaftung der Flussgebiete Spree, Schwarze Elster und Lausitzer Neiße. Arbeitsgruppe Flussgebietsbewirtschaftung Spree-Schwarze Elster, Nov. 2019.
- BWB, 2019. Sulfatbelastung der Spree. Szenarioanalyse für das Wasserwerk Friedrichshagen. 10.01.2019. Berliner Wasserbetriebe.
- DHI WASY, 2017. Erstellung des Sulfatprognosemodells Spree. Abschlussbericht, Juli 2017, DHI WASY GmbH. Im Auftrag des Landesamtes für Bergbau, Geologie und Rohstoffe des Landes Brandenburg, kofinanziert durch die Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt des Landes Berlin und dem Landesamt für Umwelt des Landes Brandenburg, veröffentlicht: <https://lbgr.brandenburg.de/cms/detail.php/bb1.c.543589.de>
- DHI WASY, 2019. Ermittlung von Zielwerten für die Spree für den Parameter Sulfat als Grundlage für einen Bewirtschaftungserlass zum Umgang mit bergbaubedingten stofflichen Oberflächengewässerbelastungen. Gesamtbericht. Oktober 2019, DHI WASY GmbH. Im Auftrag des Landesamtes für Umwelt Brandenburg, kofinanziert durch die Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin sowie das Ministerium für Wirtschaft und Energie des Landes Brandenburg, veröffentlicht: <https://mluk.brandenburg.de/sixcms/media.php/9/Endbericht-Sulfatprognosemodell-Spree.pdf>
- TrinkwV, 2001. Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung - TrinkwV).

„Natürlich.Schierke“ - hydro- und ingenieurgeologische Erkundung, hydrologische Modellierung und Validierung durch Monitoring im Zuge der Planung eines Skigebietes

Markus Bauer, Beate Klöcking, Gerd Knab, Peter Neumann, Gesine Karches

Zusammenfassung

In Schierke (Wernigerode, Sachsen-Anhalt) ist der Neubau eines Ganzjahreserlebnisgebietes am Winterberg „Natürlich.Schierke“ geplant. Dazu gehören der Bau einer Seilbahn, Pistenbaumaßnahmen, der Bau eines Kinderlandes, die Einrichtung einer Trink- und Abwasserversorgung sowie der Bau eines Speicherteichs zur technischen Beschneigung der Pisten.

Das Untersuchungsgebiet am Winterberg liegt zum einen innerhalb des Trinkwasserschutzgebietes Rappbode-System (Schutzzone III) und im Bereich aller Fließgerinne und Bäche in einem Uferabstand von 5 m zusätzlich in Schutzzone II. Zum anderen finden sich in einem zentralen Bereich des Projektgebietes verbreitet Flächen, die dem Lebensraumtyp „Fichtenmoorwald“ zuzuordnen sind und teilweise in einem FFH-Gebiet liegen. Daher kommen einer detaillierten und umfassenden hydrogeologischen Erkundung und Beweissicherung sowie einer hoch aufgelösten hydrologischen Modellierung zur Prognose des räumlichen Wasserhaushalts über die Betriebsdauer des Skigebietes hinaus eine zentrale Rolle zu. In einem Team aus verschiedenen Fachplanern (u.a. Hydrologen, Bodenkundler, Hydrogeologen) wurden interdisziplinär Berichte und Gutachten für die Genehmigungsplanung erarbeitet.

1. Ergebnisse der hydrogeologischen und hydrologischen Erkundung

Die Erkundung des Projektgebiets, das südwestlich von Schierke am Südrand des Brockenplutons liegt, umfasste neben einer großflächigen geologischen, hydrogeologischen und hydrologischen Kartierung umfangreiche technische Maßnahmen. So wurden fünf großkalibrige Bohrungen, 26 Kleinrammbohrungen und Handbohrungen, sechs Schurfe und 26 Rammsondierungen niedergebracht sowie 7 Rammpegel mit Piezometern und Datenloggern ausgebaut und zahlreiche hydraulische Feldversuche ausgeführt. Hochauflösende Geoelektrik mit zehn tomographischen Schnitten trägt schließlich zum räumlichen Verständnis von Untergrund und Grundwasser bei. Des Weiteren wurden Wasserproben der Oberflächengewässer und des Grundwassers regelmäßigen vor-Ort- und Laboranalysen unterzogen.

Der geologische Bau stellt sich wie folgt dar. Es stehen weitflächig fein- bis mittelkörnige Granite des Oberkarbons an, lokal sind Erosionsreste aus dem Mitteldevon erhalten mit Quarziten, Tonschiefern und Sandsteinen. Insbesondere während des tropisch warmen Tertiärs fand eine starke Vergrusung der Granite statt, sodass heute je nach Exposition mehr oder weniger mächtige Vergrusungszonen auf dem Festgestein vorliegen. In flacheren Hangbereichen konnten sich auf den teils selbstabdichtenden Granitgrusen ausgedehnte Moorflächen bilden, die vor allem nach Regenereignissen mit Grundwasser gesättigt vorliegen. Die aktuellen hydrogeologischen Verhältnisse resultieren aus einem Zusammenspiel zwischen natürlichen Prozessen und anthropogenen Eingriffen. Die Grundwasserströmung kann durch ein 2-Schicht-Modell generalisiert beschrieben werden. Zwar findet im unterlagernden Granit auf Klüften oder Störungszonen Wassertransport statt, in Bezug auf die Fragestellungen des Bauvorhabens ist aber der oberflächennahe Grundwasserleiter (Verwitterungsprodukte des Granits/Granitgrus, die als sandig-kiesiges Lockergestein schwankender Mächtigkeit vorliegen)

dominant, der Granit kann in diesem Kontext als Grundwasserstauer/-hemmer betrachtet werden. Dies bestätigen auch die Ergebnisse der geoelektrischen Messungen. Im mittleren Hangbereich des Projektgebiets liegt zudem eine Verebnung vor, in der es in Folge des geringeren Gefälles zu einer Verlangsamung der Fließgeschwindigkeiten und damit zu einer Retention des Grundwassers kommt. Diese Vernässung des Bodens sorgt für die Bildung anmooriger Flächen, die wiederum vermutlich wegen forstlicher Nutzung durch die systematische Anlage von Entwässerungsgräben oberflächlich drainiert wurden.

Die wasserphysikalischen Befunde zeigen, dass das im Untersuchungsareal angetroffene Oberflächenwasser als sehr schwach ionisiert zu charakterisieren ist (elektrische Leitfähigkeit: 36 bis 140 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Das beprobte Schichtwasser zeigt Leitfähigkeiten zwischen 113 und 232 $\mu\text{S}/\text{cm}$ und somit einen erwartungsgemäß höheren, aber immer noch recht niedrigen Mineralisierungsgrad an.

Außerdem zeigt das Monitoring, dass die Grundwasserverhältnisse direkt an die Niederschläge gekoppelt sind. So steigen die Grundwasserstände mit jedem verwertbaren Niederschlag sprunghaft an und laufen bei Trockenperioden wieder kontinuierlich leer. Die Aquifere besitzen eine geringe räumliche Ausdehnung und Mächtigkeit, so dass sie bei Starkregenereignissen rasch gesättigt sind und ein Großteil des Abflusses oberflächlich erfolgt. Befunde und Beobachtung legen also nahe, dass das Wasser keine hohen Verweilzeiten im Untergrund hat (rasch wechselnde Grundwasserhöhen, niedriger Mineralisierungsgrad). Der überwiegende Anteil des unterirdischen Abflusses ist als hypodermischer Abfluss zu betrachten.

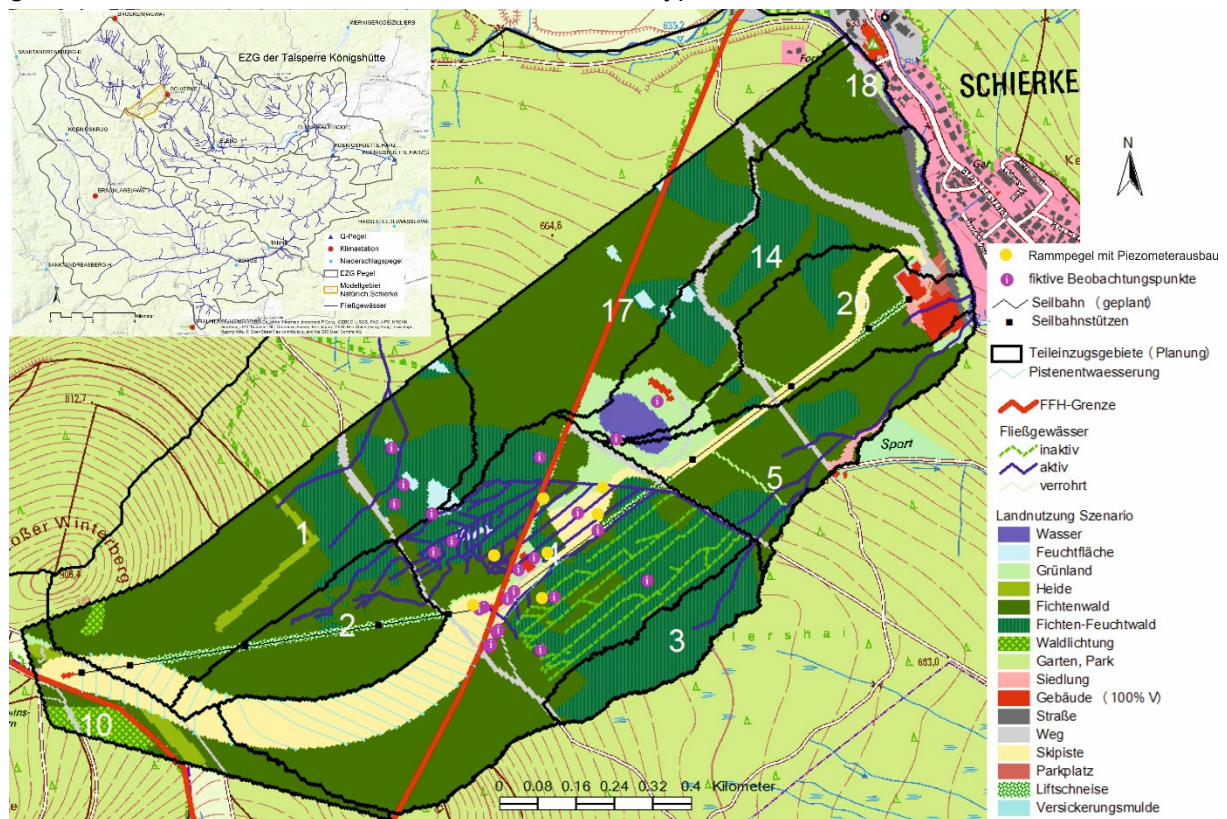


Abb. 1: Übersicht des Untersuchungsgebiets zwischen Schierke und Großem Winterberg.

2. Modellierung

Die Modellierung erfolgte dreistufig mit einem genesteten Ansatz. Zuerst wurden die möglichen Auswirkungen von „Natürlich.Schierke“ auf die Abflussverhältnisse der Kalten Bode und somit des Wasserdargebots für die Talsperre „Überleitung Königshütte“ mit ihrem Einzugsgebiet von 160 km² auf der Grundlage des landesweiten Niederschlagsabflussmodells Sachsen-Anhalt (Pfützner et al., 2013) untersucht. Die Modellvalidierung für den Ist-Zustand erfolgte anhand gemessener Gewässerdurchflüsse an den vorhandenen Pegeln im Modellraum (Elend, HWS Königshütte, Tanne, Königshütte) und beobachteter Schneehöhen an der Wetterwarte Brocken und der Klimastation Schierke. Als Folge der Rodungs- und Pistenausgleichsmaßnahmen auf ca. 14,6 ha (Planungsstand 2016) kommt es lokal zu Veränderungen des Wasserhaushalts. Die Auswirkungen auf das Durchflussverhalten der Kalten Bode sind jedoch vernachlässigbar. Schon am Pegel Elend sind keine Änderungen der mittleren Abflüsse mehr festzustellen. Demzufolge sind auch keine Beeinträchtigungen hinsichtlich der Bereitstellung der Rohwassermenge zur Trinkwasserversorgung aus der Rappbodetalsperre zu erwarten.

Im zweiten Schritt erfolgte eine räumlich höher auflösende Modellierung für das 25 km² große Einzugsgebiet der Kalten Bode bis zum Pegel Elend zuzüglich des Quellbereiches der Bremke (Warme Bode, 7 km²). Schwerpunkte dieser Untersuchungen waren die Auswirkungen der technischen Beschneigung auf den lokalen Wasserhaushalt und die Abflussdynamik der Kalten Bode unter den Bedingungen des Klimawandels (Basis: Regionalmodell WETTREG-2010, Globalmodell A1B/ECHAM5). WETTREG-2010 simuliert für die nahe Zukunft (2021-2050) einen Anstieg der Lufttemperaturen um 1,6 K bei Abnahme der Sommerniederschläge. Ohne technische Beschneigung wäre unter diesen Bedingungen ein Skibetrieb am Winterberg nur eingeschränkt möglich. Die simulierten klimatischen Bedingungen erlauben jedoch auch weiterhin eine Beschneigung von Ende Dezember bis Mitte März. Der Wasserbedarf liegt dabei um 26-48 % über den benötigten jährlichen Mengen in der Referenzperiode 1981-2010. Dank der erhöhten Winterniederschläge führt auch in der nahen Zukunft die Kalte Bode im Bereich der geplanten Entnahmestelle ausreichend Wasser, um diesen Anspruch bei Gewährleistung des vorgegebenen Mindestabflusses von 105 l/s zu befriedigen.

2017/2018 wurden die Planungen zu „Natürlich.Schierke“ aufgrund der vorliegenden Gutachten überarbeitet (Verringerung der Pistenfläche, Querentwässerungsgräben mit Versickerungsmulden, neues Seilbahnkonzept etc.). Ziel war die Minimierung der Auswirkungen auf die geschützten Moorwälder im Umkreis des Planungsraumes. Die Wirksamkeit dieser Maßnahmen wurde mit einer erneuten gekoppelten Modellierung für ein 65 ha großes Gebiet mit einer räumlichen Auflösung von 5 m x 5 m (Einzugsgebiet des Grabens 216) überprüft. Die Simulation des Wasserhaushaltes erfolgte wie in den vorangegangenen Studien mit dem Modellsystem ArcEGMO-PSCN (Pfützner, 2002), die Abbildung der instationären Grund- und Hangwasserströmung mit dem Modell MODFLOW (McDonald & Harbaugh, 1988). Das erforderliche hydrogeologische Modell wurde auf der Grundlage der geologischen Karte 1:25000, untersetzt mit den Ergebnissen der lokalen Erkundung, erarbeitet. Die Kalibrierung erfolgte anhand der gemessenen Grundwasserstände.

3. Ergebnisse

Mit den Mitteln der Geländebegehung, Kartierung, Erkundung, Geoelektrik konnte eine hydrogeologische Modellvorstellung des Projektgebietes entwickelt werden, die u. a. als Grundlage für die gekoppelte Modellierung verwendet wurde. Die interdisziplinäre Zusammenarbeit von Experten verschiedener Fachgebiete und der ständige fachliche Dialog führten dazu, ein Modell zu entwickeln, mit dem auf Basis der aktuellen Klimamodelle hoch aufgelöste Abschätzungen zu hydrologischen, hydrogeologischen und damit auch zu umweltrelevanten Fragestellungen für das Projekt auch in weiterer Zukunft möglich sind.

Durch die geplante Beschneidung einer Fläche von ca. 13,2 ha kommt es zu einer Erhöhung des Wasserdargebots im Einzugsgebiet des Grabens 216 um ca. 41 mm pro Jahr und Quadratmeter im dreißigjährigen Gebietsmittel. Das führt gemeinsam mit der verringerten Verdunstung auf den bebauten bzw. als Skipiste oder Liftrasse genutzten Flächen zu einer erhöhten Abflussspende des Gebiets (Anstieg des mittleren Abflusses MQ um 3,1 %) im Vergleich zur Ist-Situation. Durch die geplante Pistenentwässerung mit angeschlossenen Retentionsbecken sowie dem Rückbau des dichten Grabensystems im Bereich der geplanten Mittelstation kann eine Verschiebung der Abflusszusammensetzung zugunsten der langsamen unterirdischen auf Kosten der schnellen oberflächennahen Abflusskomponenten bewirkt werden. Das führt zu einer Reduktion der Hochwasserspitzen und der Erhöhung der Niedrigwasserabflüsse. Entsprechend den Ergebnissen der gekoppelten Modellierung der Grundwasserströmung wird sich der Grundwasserzustrom aus dem oberstrom-gelegenen Festgesteinsbereich bzw. den hangseitig-gelegenen Hydrotopen zum Lockergesteinsbereich nur geringfügig ändern und dabei leicht zunehmen. Sowohl über den gesamten Betrachtungszeitraum als auch nahezu über die gesamte Fläche des Lockergesteinsbereichs wird es flächendeckend zu einer Aufhöhung der oberflächennahen Grundwasserstände durch die Umsetzung der geplanten Maßnahmen kommen. Nur in sehr kleinen Bereichen, im unmittelbaren Umfeld des Speicherbeckens und unter den geplanten Gebäuden (Seilbahnmittelstation und Nebengebäude/Gastronomie) stellen sich geringfügig niedrigere Grundwasserstände ein.

Die Ergebnisse lassen die Schlussfolgerung zu, dass auf Grund der zu erwartenden Auswirkungen des Betriebes von „Natürlich.Schierke“ auf die Grundwasserströmungsverhältnisse im Lockergesteinsbereich, von einer Unschädlichkeit bzw. sogar von einem positiven Einfluss auf die Feuchtbiotope und der Bedingungen für die standortspezifische Vegetation auszugehen ist.

Literatur

- McDonald, M. G., Harbaugh, A. W., 1988. MODFLOW - A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model. - U.S. Geological Survey.
- Pfützner, B., Klöcking, B., Schumann, A., Hesse, P., 2013. Klimafolgenstudie 2012, Wasser; In: Berichte des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt - Halle (2013) Heft 5 (Band 1), ISSN 0941-7281.
- Pfützner, B., 2002. Modelldokumentation ArcEGMO. Online 2002. <http://www.arcegmo.de>. ISBN 3-00-011190-5.

Der Zusammenhang zwischen Pedotransferfunktion und Modellverhalten

Markus Casper, Sonja Teschemacher, Hadis Mohajerani, Oliver Gronz

Zusammenfassung

Die Parameter der van Genuchten-Gleichung werden oft mithilfe sogenannter Pedotransferfunktionen empirisch geschätzt. In der Literatur finden sich zahlreiche Pedotransferfunktionen, wobei die jeweilige Auswahl mangels geeigneter Kriterien oftmals zufällig erfolgt. Diese Studie versucht herauszuarbeiten, welchen Effekt die Wahl der Pedotransferfunktion auf das Simulationsergebnis hat. Als Testgebiet dient das Einzugsgebiet der Glonn (Zufluss der Amper). Insgesamt wurden elf verschiedene Ansätze zur Bestimmung der gesättigten Leitfähigkeit und der Parameter der van Genuchten-Gleichung eingesetzt. Es wurde deutlich, dass die Pedotransferfunktionen eine große Bandbreite an Modellverhalten erzeugen. Insbesondere die Aufteilung des Wassers im System unterscheidet sich stark. Daraus folgernd sollte die Bodenparametrisierung stärker an einer korrekten hydrologischen Verhaltensabbildung orientiert werden. Dazu sind allerdings zusätzliche Informationen notwendig, die normalerweise aufwendig erhoben (z. B. durch Kartierung) werden müssen.

1. Einleitung

Viele hydrologische Modelle benutzen die Richards-Gleichung, um den Wasserfluss im ungesättigten Boden zu beschreiben. Dieser Ansatz wird im Allgemeinen als „physikalisch basiert“ beschrieben. Um die Richards-Gleichung einsetzen zu können, müssen die hydraulischen Eigenschaften des Bodens parametrisiert werden (Speicherfähigkeit, hydraulische Leitfähigkeit). Ein möglicher Ansatz ist das Modell von van Genuchten. Dabei werden die Parameter der van Genuchten-Gleichung oft mithilfe sogenannter Pedotransferfunktionen empirisch geschätzt. In der Literatur finden sich zahlreiche Pedotransferfunktionen. Mangels geeigneter Kriterien erfolgt die Auswahl einer Pedotransferfunktion jedoch oftmals zufällig. Diese Studie versucht herauszuarbeiten, welchen Effekt die Wahl der Pedotransferfunktion auf das Simulationsergebnis hat. Dazu werden elf verschiedene Ansätze zur Bestimmung der gesättigten Leitfähigkeit und der Parameter der van Genuchten-Gleichung eingesetzt. Die Simulationsergebnisse werden unterschiedlich ausgewertet: (a) nach dem Abflussverhalten am Pegel (Spitzen, Niedrigwasserabfluss, Reaktivität), (b) nach räumlichen Mustern der Bodeneigenschaften im Vergleich zum Referenzmodell und (c) nach dem Abflussbildungsprozess (HOF/SSF/DP).

2. Material und Methoden

Als Testgebiet dient das Einzugsgebiet der Glonn (Zufluss der Amper) in Bayern. Für dieses Testgebiet existiert ein WaSiM-Modell mit einer räumlichen Auflösung von 100mx100m (Rieger et al. 2017, Schulla 2019). Insgesamt werden elf verschiedene Ansätze zur Bestimmung der gesättigten Leitfähigkeit und der Parameter der van Genuchten-Gleichung verwendet (Tabelle 1). Als Basis für einen Modellvergleich dient ein am Abfluss kalibriertes Modell mit der Parametrisierung 1. Um eine möglichst objektive Bewertung vorzunehmen, werden die Unterschiede im Abflussverhalten in Form von „Signature Indices“ (Casper et al. 2012) dargestellt. Diese bewerten die absolute Abweichung (Bias_{RR}), die Änderung der Reaktivität (Bias_{Midslope}) und die Änderung des Volumens der Hochwasserspitzen (Bias_{FHV}) und der Niedrigwasserabflüsse (Bias_{FLV}). Als weitere Bewertungsmöglichkeit bietet sich die Wasserbilanz an, die auch die einzelnen Abflusskomponenten (HOF/SOF, SSF, DP) aufschlüsselt.

Tab. 1: Liste der Pedotransferfunktionen (11 Varianten)

	Pedotransferfunktion (van Genuchten Parameter) nach	Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit nach		Pedotransferfunktion (van Genuchten Parameter) nach	Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit nach
1	Wösten et al. (1999)	KA5 (2005)	8	Wösten et al. (1999)	Wösten et al. (1999)
2	Wessolek et al. (2009)	KA5 (2005)	9	Wessolek et al. (2009)	Wessolek et al. (2009)
3	Weynants et al. (2001)	KA5 (2005)	10	Zang & Schaap (2017): Rosetta H2w	Zang & Schaap (2017): Rosetta H2w
4	Zacharias & Wessolek (2007)	KA5 (2005)	11	Zang & Schaap (2017): Rosetta H3w	Zang & Schaap (2017): Rosetta H3w
5	Teepe et al. (2003)	KA5 (2005)			
6	Zang & Schaap (2017): Rosetta H2w	KA5 (2005)			
7	Zang & Schaap (2017): Rosetta H3w	KA5 (2005)			

3. Ergebnisse

Die Signature Indices verdeutlichen das unterschiedliche Verhalten der Modellvarianten. Die kalibrierte Variante 1 zeigt erwartungsgemäß nur geringfügige Abweichungen. Da die Wahl der Pedotransferfunktion einen Einfluss auf die Verdunstungshöhe hat, gibt es sichtbare Abweichungen in der Wasserbilanz (Bias_RR bis -9% bei Variante 4). Sehr deutlich erkennbar ist die stark erhöhte Reaktivität (Bias_Midslope) der Varianten 4, 5 und 7. Auch die Volumina der Hochwasser- (BiasFHV) bzw. der Niedrigwasserabflüsse (BiasFLV) weichen hier deutlich ab. Die meisten Varianten zeigen eine Unterschätzung der Hochwasserspitzen, nur Variante 4 überschätzt diese.

Tab. 2: Signature Indices nach Varianten

Variante	Bias_RR	Bias_Midslope	BiasFHV	BiasFLV
1	-3.34	-1.00	-5.30	+0.7
2	-5.70	+6.42	+4.23	-12.97
3	-7.89	-0.04	-9.03	-7.69
4	-9.29	+85.57	+35.86	-47.02
5	-8.46	+41.83	-16.52	-25.08
6	-3.88	+18.9	-28.61	-6.69
7	+0.62	+36.65	-25.00	-21.66
8	-2.83	-0.10	-7.66	+0.51
9	-3.95	-1.15	-27.59	+4.75
10	-3.79	-4.57	-38.16	+3.77
11	-0.29	+25.75	-22.39	-18.03

Durch die Wahl der Pedotransferfunktion ändert sich die Form und die Lage der Wasserspannungskurve, somit sind wichtige Eigenschaften des Bodens wie zum Beispiel die nutzbare Feldkapazität (nFK) räumlich stark unterschiedlich verteilt (Abb. 1).

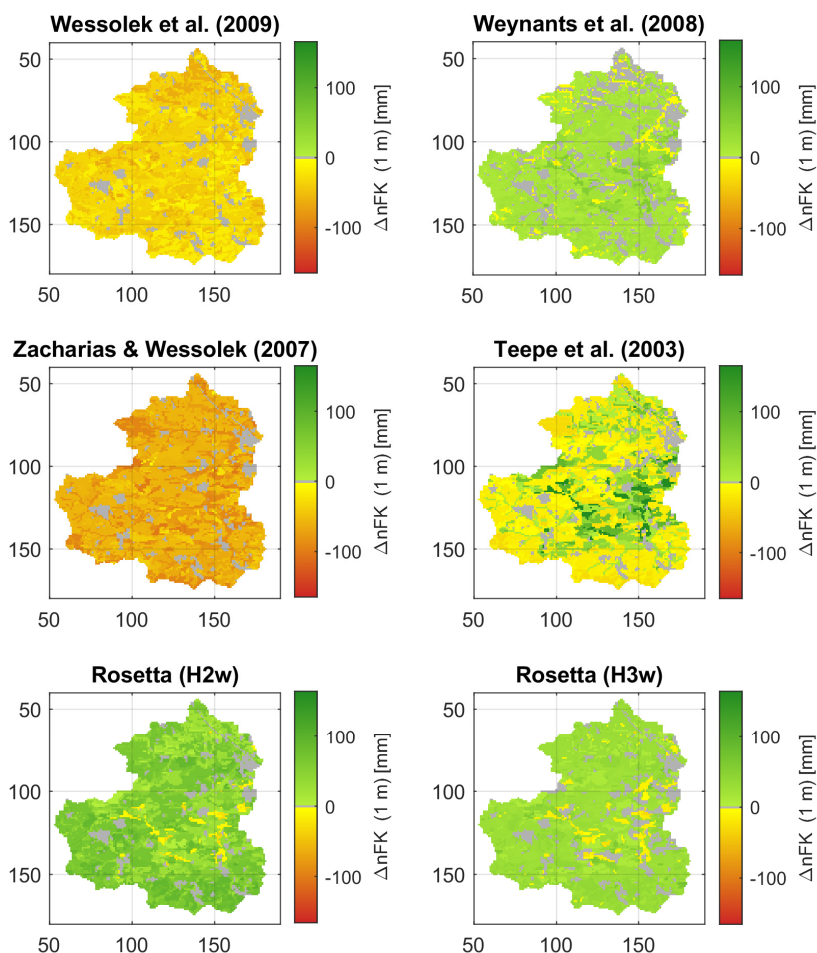


Abb. 1: Räumliche Verteilung der nutzbaren Feldkapazität im Verhältnis zu Parametrisierungsvariante 1 (Wösten et al. 1999) (Varianten 2 bis 7).

Betrachtet man vor diesem Hintergrund die Wasserbilanzkomponenten der einzelnen Varianten sind ebenfalls deutliche Unterschiede in der Wasseraufteilung sichtbar (Tab. 3).

Tab. 3: Abflusskomponenten in mm/a

Variante	Oberflächenabfluss	Zwischenabfluss	Basisabfluss	ETr
1	39	117	121	578
2	42	121	108	579
3	41	113	110	592
4	50	117	95	599
5	37	89	136	598
6	34	120	122	584
7	34	135	106	584
8	39	121	119	577
9	36	123	117	575
10	35	107	133	584
11	35	133	108	585

Besonders deutlich wird dieser Unterschied beim Vergleich der Varianten 4 (Zacharias & Wessolek 2007) und 5 (Tepee et al. 2003).

3. Diskussion

Diese Studie hat gezeigt, dass durch die Auswahl der Pedotransferfunktionen eine große Bandbreite an unterschiedlichem Modellverhalten erzeugt werden kann. Diese Unterschiede können teilweise durch eine Kalibrierung des Modells kompensiert werden. Da sich jedoch die Aufteilung des Wassers im System stark unterscheidet zwischen den einzelnen Varianten, wird vorgeschlagen, die Bodenparametrisierung stärker an einer korrekten hydrologischen Verhaltensabbildung zu orientieren. Dazu sind allerdings zusätzliche Informationen notwendig, die meist aufwendig erhoben werden müssen, z. B. durch Kartierung der Abflussprozesse im Gebiet (DWA 2020) oder die Bestimmung von Verdunstungsmustern mit fernerkundlichen Methoden (Casper & Vohland 2008).

Literatur

- Casper, M.C., Grigoryan, G., Gronz, O., Gutjahr, O., Heinemann, G., Ley, R. and Rock, A. (2012): Analysis of projected hydrological behavior of catchments based on signature indices, *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16, 409-421, 2012
- Casper, M.C., Vohland, M. (2008): Validation of a large scale hydrological model with data fields retrieved from reflective and thermal optical remote sensing data – A case study for the Upper Rhine Valley, *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 33:17/18, pp 1061-1067.
- DWA (2020): DWA-Merkblatt M-922 „Bodenhydrologische Kartierung“. Hennef.
- KA5 / Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden der Staatlichen Geologischen Dienste und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2005). *Bodenkundliche Kartieranleitung mit 103 Tabellen und 31 Listen*. Schweizerbart.
- Rieger, W.; Teschemacher, S.; Haas, S.; Springer, J.; Disse, M. (2017): Multikriterielle Wirksamkeitsanalysen zum dezentralen Hochwasserschutz. *WasserWirtschaft*, 107, 56–60.
- Schulla, J. (2019): *Model Description WaSiM: Water balance Simulation Model*. Zürich.
- Teepe, R., Dilling, H., & Beese, F. (2003). Estimating water retention curves of forest soils from soil texture and bulk density. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 166(1), 111-119.
- Zacharias, S., Wessolek, G. (2007). Excluding organic matter content from pedotransfer predictors of soil water retention. *Soil Science Society of America Journal*, 71(1), 43-50.
- Vereecken, H., Weynants, M., Javaux, M., Pachepsky, Y., Schaap, M. G., & Genuchten, M. T. (2010). Using pedotransfer functions to estimate the van Genuchten–Mualem soil hydraulic properties: A review. *Vadose Zone Journal*, 9(4), 795-820.
- Zhang, Y., Schaap, M. G. (2017). Weighted recalibration of the Rosetta pedotransfer model with improved estimates of hydraulic parameter distributions and summary statistics (Rosetta3). *Journal of Hydrology*, 547, 39-53.
- Wösten, J. H. M., Lilly, A., Nemes, A., Le Bas, C. (1999). Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma*, 90(3-4), 169-185.
- Wessolek G, Kaupenjohann M, Renger M (2009) *Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis*. Rote Reihe, vol 40. TU Berlin, Institut für Ökologie, Fachgebiet Bodenkunde, Standortkunde und Bodenschutz, Berlin

Die simultane Bewirtschaftung von Wasserbereitstellung und -bedarf einer Talsperre unter Bedingungen extremer Wasserknappheit

Alexandra Dietz, Jens Grundmann, Niels Schütze

Zusammenfassung

Wasserwirtschaftliche Speichersysteme dienen dem Ausgleich von Wassernachfrage und dem natürlichen Wasserdargebot. In der Regel wird in Situationen größerer Wasserknappheit zuerst die Wasserversorgung für die Landwirtschaft eingeschränkt, meist ohne Rücksicht auf Ertragseinbußen am Ende der Wachstumsperiode. Um die Möglichkeiten eines dynamischen Bedarfsmanagements der Landwirtschaft durch Defizitbewässerung zu untersuchen, wurde das Talsperren-Bewässerungsmodell RODIT (Reservoir Operation and Deficit Irrigation Toolbox) entwickelt. RODIT umfasst, neben einem Speichermodell und dem Ertragsmodell AquaCrop, eine starre und zwei adaptive Bewässerungsstrategien (adaptiver Bewässerungsplan und optimierte Entscheidungstabelle). RODIT wurde im Rahmen von realitätsnahen, numerischen Experimenten mit Szenarien zunehmender Wasserknappheit und bei unterschiedlichem Informationsstand hinsichtlich der Wetterentwicklung getestet und angewendet. Bei Defizit-Szenarien erzielte das adaptive Bewässerungsmanagement den größten Nutzen. Damit konnte der Nutzen des adaptiven Bewässerungsmanagements nachgewiesen werden.

1. Einleitung

Wasserversorgung bildet einen wesentlichen Grundstein in heutigen Gesellschaften. Da Wasserverfügbarkeit und Wasserbedarf häufig räumlich und zeitlich voneinander abweichen, spielen wasserwirtschaftliche Speicher und Speichersysteme eine wichtige Rolle, um auch in Trockenzeiten Wasserbedarfe zu decken oder Anlieger eines Gewässers vor den Auswirkungen von Hochwassern zu schützen. Besonders bei Mehrfachnutzung von Talsperren resultieren aus den unterschiedlichen Zielen der Nutzergruppen konkurrierende Ansprüche an die Speicherbewirtschaftung, wie der Bereitstellung von Trinkwasser, Erzeugung von Wasserkraft, dem Schutz vor Hochwasser oder des Stausees als Erholungsort (ICOLD, 2013).

Wachsende Bevölkerung und Witterungsänderungen im Zuge des Klimawandels erfordern mehr denn je eine effiziente Verwaltung und Verteilung der verfügbaren Wasserressourcen. Die Landwirtschaft spielt dabei eine kritische Rolle: 50% der weltweit registrierten Talsperren dienen ausschließlich zur Bereitstellung von Bewässerungswasser, (ICOLD, 2013). 18% der globalen Agrarflächen werden bewässert und decken somit rund 40 - 45% der weltweiten Lebensmittelproduktion (Döll & Siebert, 2002).

Die theoretischen Möglichkeiten, Wassernutzung der Landwirtschaft im Rahmen der Bewässerung effizienter zu gestalten, sind vielfältig (Iglesias et al., 2011).

Kern dieser Arbeit ist die Untersuchung verschiedener Bewässerungsmanagementstrategien im Fall einer reduzierten Wasserverfügbarkeit. Als Referenz gilt nichtadaptives Management, also Bewässerung nach Plan, wobei geplante Bewässerungsereignisse umgesetzt werden, solange Wasser zur Verfügung steht. Adaptive Bewässerungsstrategien setzen auf den Umstieg auf einen Defizitbewässerungsplan mit höherer Wasserproduktivität, bei dem ein geringerer Ertragsverlust zugunsten größerer Wassereinsparung in Kauf genommen wird. Untersucht wurde der Nutzen adaptiver Bewässerungsstrategien gegenüber dem Referenzfall in Form von minimierten Ertragseinbußen.

Zu diesem Zweck wird ein Talsperren-Bewässerungslandwirtschaftsmodell (TBM) entwickelt, mit welchem die Reaktion der Bewässerungslandwirtschaft auf die reale Wasserlieferung der Talsperrenbewirtschaftung simuliert werden kann. So sollen durch Optimierung des Bewässerungsplanes Ertragsverluste reduziert und dazu beigetragen werden, die Wasserverteilung nachhaltiger zu gestalten.

2. Modellaufbau

RODIT besteht aus einem Speicherbewirtschaftungsmodul und einem Bewässerungslandwirtschaftsmodul (Abb. 1). Die Eingangsdaten (gelb) werden teilweise von beiden Modulen genutzt. Die wichtigsten Ausgangsdaten sind in Magenta dargestellt. Von dem Speicherbewirtschaftungsmodul werden Charakteristika der Speicher sowie des Speicherverbunds benötigt, Informationen über Zufluss und geforderte Abgaben sowie Klimadaten, wenn Niederschlag und Evaporation der Seefläche oder Grundwasserinteraktion betrachtet werden sollen. Das Bewässerungslandwirtschaftsmodul benötigt Informationen über Klima, Boden und Pflanze. Für die Bewässerungsoptimierung wird die an der TU Dresden entwickelte Deficit Irrigation Toolbox (DIT) genutzt.

Die Speicherbewirtschaftung ist monatlich und wöchentlich ausführbar, die DI-Toolbox arbeitet im TBM mit Bewässerungsereignissen aller sieben Tage. Die Module sind über den Bedarf an Bewässerungswasser gekoppelt. Um eine Kommunikation zwischen den Modulen herzustellen, wird die Größe der insgesamt zu bewässernden Feldfläche benötigt.

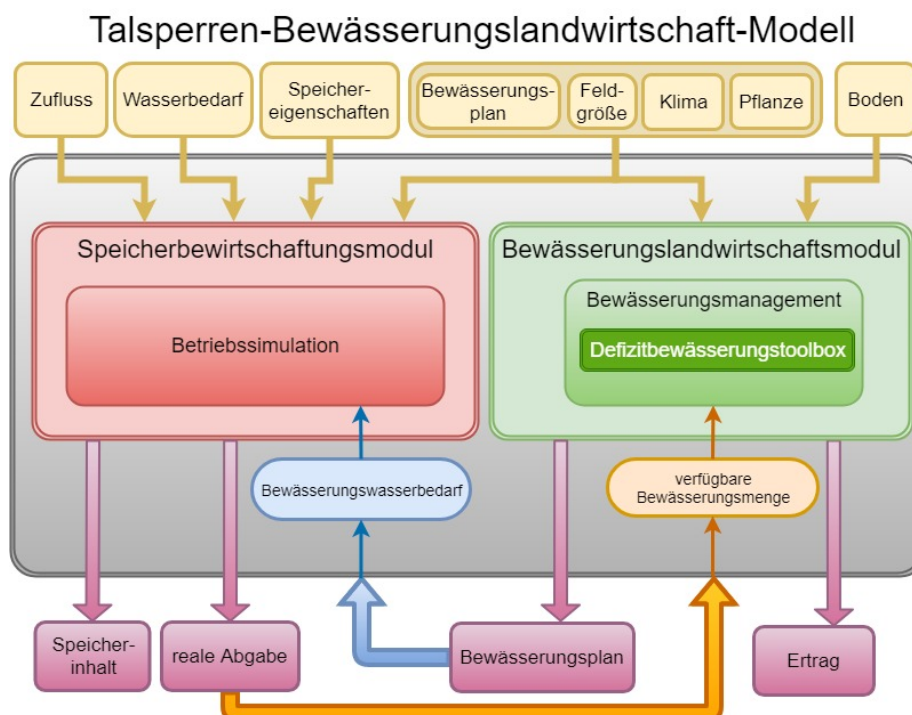


Abb. 8: RODIT-Modellschema mit wichtigsten Eingangsdaten (gelb), wichtigsten Ausgabegrößen (magenta), dem Speicherbewirtschaftungsmodul (rot) und dem Bewässerungslandwirtschaftsmodul (grün). Die beiden Module sind über das benötigte (blau) und verfügbare (gelb) Bewässerungswasser verbunden.

In einer Simulation wird zunächst der Bewässerungsbedarf für den Standort und jede Nutzpflanze bestimmt und im Anschluss die Betriebssimulation aller betrachteten Speicher durchgeführt. Darauf basierend findet das Bewässerungsmanagement für jede Nutzpflanze statt. Für die adaptiven Strategien stehen zwei Optimierer zur Verfügung: GET-OPTIS und die Entscheidungstabelle.

Entstehen aufgrund der Speicherbewirtschaftung Defizite für die Bewässerungslandwirtschaft, wird für jede Nutzpflanze die verfügbare Wassermenge zur Bewässerung aus dem vom Speicher gelieferten Wasser und der jeweiligen Feldgröße berechnet und nach einer der vier implementierten Strategie verteilt:

- Strategie 1: nicht adaptives Bewässerungsmanagement (Referenz)
- Strategie 2: adaptives Bewässerungsmanagement ohne Kurzfristvorhersage des Wetters
- Strategie 3: adaptives Bewässerungsmanagement mit Kurzfristvorhersage des Wetters
- Strategie 4: adaptives Bewässerungsmanagement mit perfekter Information über das Wetter der Anbauperiode

3. Experimentelle Verifikation und Fallbeispiel

Um das Modell auf seine Funktionalität zu prüfen, wurden fünf verschiedene Szenarien unterschiedlicher Wasserverfügbarkeit entworfen, an denen die verschiedenen Bewässerungsmanagementstrategien getestet wurden. Die Szenarien repräsentieren fünf verschiedene Stadien der landwirtschaftlichen Wasserversorgung: Vollversorgung, Bedarfsdeckung zu 75%, 50% und 25% sowie Versorgungsausfall. RODIT wurde so auf seine Tauglichkeit hin geprüft, mögliche Versorgungsfälle darzustellen und auf unterschiedliche Bedingungen zu reagieren. Das Modell wurde abschließend auf ein reales Talsperrenbewirtschaftungs-Bewässerungslandwirtschaft-System, das Gebiet des Zayandeh Rud (Iran) angewandt. Die untersuchten Nutzpflanzen sind Mais und Tomate.

Tab. 4: Ertrag und Bewässerungsmenge des Szenarios 75%-iger Wasserversorgung

	Referenz	Strategie 2		Strategie 3		Strategie 4
		GET-OPTIS	Entscheidungstabelle	GET-OPTIS	Entscheidungstabelle	GET-OPTIS
Ertrag t/ha	15.8	15.8	15.8	15.7	15.9	15.7
Wassermenge mm	482	407	468	411	456	403

Es hat sich gezeigt, dass der Bewässerungserfolg maßgeblich von der Wasserverfügbarkeit abhängt. Besonders in ariden Gebieten kann der landwirtschaftliche Erfolg nicht durch Regenwasser garantiert werden. Die Verfügbarkeit von pflanzennutzbarem Wasser während der trockenstresssensitiven Entwicklungsstadien der angebauten Pflanze ist essentiell. Anhand der Beispiele 50%-iger Wasserversorgung und dem Fallbeispiel hat sich deutlich gezeigt, dass Einschränkungen in der Wasserversorgung zur Zeit der Blüte und Ertragsbildung in den Monaten Juni und Juli große Auswirkungen auf den Anbauerfolg und erzielbaren Ertrag haben.

Aus beiden Untersuchungen geht hervor, dass einzelne hohe Bewässerungsereignisse im Vergleich zu mehreren kleinen Bewässerungsereignissen den Nutzen des Bewässerungsmanagements erhöhen. Bei unzureichender Wasserverfügbarkeit, die die Ertragssicherung gefährdet, sollten andere landwirtschaftliche Managementstrategien in Betracht gezogen werden. Möglich ist eine Reduktion der Anbaufläche und Bewässerung für eine geringere Pflanzenanzahl. Eine Prognose der Wasserversorgung wird für zukünftige Untersuchungen empfohlen.

Adaptives Bewässerungsmanagement erzielte bei Defizitszenarien den größten Nutzen. Perfekte Information über das Wetter der Anbauperiode und Vorhersage der Wetterentwicklung verringerten Ertragseinbußen zusätzlich. Durch Integrieren eines flexiblen Bewässerungsmanagements können Ertragsverluste verringert und so bessere Kompromisslösungen für alle Nutzer gefunden und somit der Nutzen adaptiven Bewässerungsmanagements nachgewiesen werden.

Literatur

- Döll, P. & Siebert, S. (2002). Global modeling of irrigation water requirements. *Water Resources Research*, 38 (4), 8–1.
- Iglesias, A., Quiroga, S. & Diz, A. (2011, 07). Looking into the future of agriculture in a changing climate. *European Review of Agricultural Economics*, 38 (3), 427-447. Zugriff auf <https://doi.org/10.1093/erae/jbr037> doi: 10.1093/erae/jbr037
- International Commission On Large Dams. (2013). General synthesis. Zugriff am 2019-05-01 auf http://www.icold-cigb.org/GB/World_register/general_synthesis.asp

Langzeitmessungen der Niederschlagsinterzeption in einem Fichtenbestand im Tharandter Wald

Sandra Grunicke, Max Plorin, Ronald Queck, Christian Bernhofer

Zusammenfassung

Die statistische Bestimmung von Parametern für die Anwendung in Interzeptionsmodellen erfordert Messungen von Bestandes- und Freilandniederschlag über viele Jahre. Für die Ankerstation im Tharandter Wald (ICOS - fichtendominierter Waldbestand) besteht ein solcher Langzeitdatensatz über 22 Jahre (1997-2018), für den die Niederschlagsinterzeption auf Basis von Einzelereignissen berechnet wurde. Zwei Durchforstungsmaßnahmen führten zur Auflichtung des Bestandes, die mithilfe von strahlungsbasierten PAI-Daten (Plant Area Index) nachgewiesen werden konnte. Darauf basierend erfolgte eine Einteilung der Messdaten in drei Perioden mit unterschiedlicher Bestandesdichte. Für unterschiedliche Zeiträume (drei Perioden, Gesamtzeitraum, Einzeljahre) wurden statistische Parameter (Anteil durchfallenden Niederschlags p , Sättigungskapazität P_s und Speicherkapazität S) ermittelt und in einem Regressionsmodell getestet. S und P_s nahmen mit jeder Durchforstung ab, während eine Abnahme der Interzeption und die Zunahme von p nur für die erste Durchforstung festgestellt wurde. Periodenspezifische Parameter erzielten die besten Modellergebnisse, eine ebenfalls hohe Modellgüte wurde mit Parametern des Gesamtzeitraums erreicht und größere Abweichungen zwischen Modell und Messungen ergaben sich für auf Einzeljahren basierende Parameter. Eine verlässliche Parameterermittlung ist abhängig von der Länge des Messzeitraumes und die Berücksichtigung von Vegetationsänderungen verbessert naturgemäß die Modellgüte.

1. Einleitung

Wälder spielen eine wichtige Rolle im hydrologischen Kreislauf. Niederschlag der auf ein Kronendach fällt, kann entweder direkt zum Boden tropfen, von Ästen und Zweigen abtropfen (TF - durchfallender Niederschlag) oder als Stammabfluss (SF) ablaufen. Das verbleibende Niederschlagswasser wird im Bestand gespeichert (Interzeption I) und verdunstet von dort aus (ARNELL 2002; CROCKFORD und RICHARDSON 2000). Neben klimatischen Einflüssen wie z.B. der Niederschlagscharakteristik (Niederschlagsmenge, -intensität, -dauer, Windgeschwindigkeit) und den Verdunstungsbedingungen im Bestand (CROCKFORD und RICHARDSON 2000) spielen die Eigenschaften der Vegetation eine entscheidende Rolle bei der Interzeption (ARNELL 2002). Parameter, die die Modellbeschreibung dieser Vegetationseigenschaften in Interzeptionsmodellen ermöglichen, können mithilfe regressiver Verfahren aus der Beziehung zwischen durchfallendem Niederschlag und Bruttoniederschlag ermittelt werden (JACKSON 1975; LEYTON et al. 1967). Für die hier vorgestellten Analysen stand ein Datensatz von Bruttoniederschlag und durchfallenden Niederschlag über 22 Jahre (1997-2018) zur Verfügung. Ziel war es, die Veränderung des Bestandes und damit einhergehende Veränderungen der Bestandesparameter sowie der Interzeption zu untersuchen. Die Parameter wurden außerdem in einem Regressionsmodell getestet, um zu untersuchen, ob die Verwendung von periodenspezifischen Parametern, auch zu einer Verbesserung der Modellgüte führt.

2. Methoden

Für die Ankerstation im Tharandter Wald stehen Messungen des Bestandesniederschlags für einen forstlich genutzten Fichtenstandort (*Picea abies*) seit 1997 zur Verfügung. Zur Messung

verwendet werden Bestandesniederschlagsrinnen mit einem Sammelfass und einer Drucksonde. Messungen des Freilandniederschlags finden auf einer ca. 130 m westlich gelegenen Freifläche statt. Unter Vernachlässigung des Stammabflusses (GHIMIRE et al. 2012; ROTHACHER 1963) wurde die Interzeption als Differenz zwischen Freiland- und Bestandesniederschlag errechnet und die 10-Minuten Werte mit einer Trennzeit von 3 h zu Einzelereignissen zusammengefasst. Die Veränderung der Vegetation durch zwei Holzentnahmen in den Jahren 2002 und 2011 konnten mithilfe von kontinuierlichen PAI-Daten (Plant Area Index), die aus Messungen der kurzwelligen Strahlung in und über dem Bestand berechnet wurden (BREDA 2003), nachgewiesen werden. Die Breakpoint-Analyse in Abb. 1 zeigt die zwei Holzentnahmen als nachweisbare Einschnitte in die Vegetationsstruktur. Entsprechend dieser Einschnitte wurden die Niederschlagsdaten in drei Perioden mit unterschiedlichen Vegetationseigenschaften eingeteilt.

Die Bestandesparameter wurden mithilfe von Regressionsanalysen aus der Beziehung zwischen Brutto- und Bestandesniederschlag ermittelt (LINK et al. 2004). Die Speicherkapazität S , die Sättigungsmenge P_s und der Anteil des durchfallenden Niederschlags p wurden für den Gesamtzeitraum, die drei Perioden und für Einzeljahre ermittelt und in einem Regressionsmodell getestet.

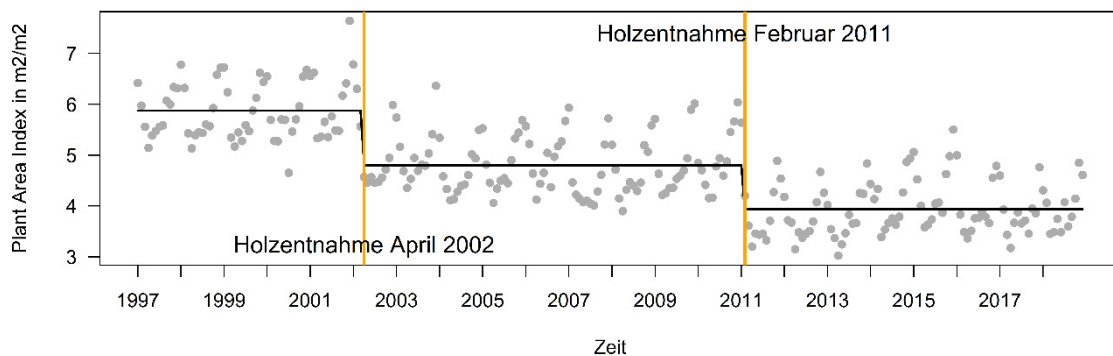


Abb. 1: Aus kurzweiliger Strahlung ermittelte PAI-Daten; orange Linien zeigen die Zeitpunkte der Holzentnahme; schwarze Linie zeigt die Breakpoint-Regression.

3. Ergebnisse

Ein Vergleich des Interzeptionsanteils der drei Perioden ist in den Boxplots in Abb. 2 dargestellt. Signifikante Unterschiede zeigten sich zwischen Periode 1 und 2 ($p < 0,001$) sowie zwischen Periode 1 und 3 ($p > 0,001$). Kein signifikanter Unterschied konnte zwischen Periode 2 und 3 festgestellt werden (einfaktorielle Anova, $df=2$, $F=55$, $p > 0,001$ mit Tukey post-hoc Test). Aus den Regressionsanalysen ergaben sich für den Gesamtzeitraum ein p von 0,35, ein S von 2,92 mm und ein P_s von 4,53 mm. Für die drei Perioden, die anhand der Vegetationsänderung eingeteilt wurden, zeigte sich für S und P_s eine Abnahme über alle drei Perioden (P_s von 4,77 mm zu 4,42 mm und S von 3,48 mm auf 2,75 mm). Dabei stieg p nur von Periode 1 zu Periode 2 von 0,27 auf 0,39 und blieb dann konstant. Für die Parameter der Einzeljahre ließ sich keine Übereinstimmung mit den Durchforstungsmaßnahmen feststellen. Die ermittelten Parameter wurden in Regressionsmodellen getestet: a) mit Daten für Einzeljahre (1 Modell pro Jahr), b) mit Daten für die drei Perioden (1 Modell pro Periode) und c) für den Gesamtzeitraum. Die beste Modellgüte (siehe Tab. 1) erreichte das Modell, das Parameter für die drei Perioden

nutzte und damit die Vegetationsänderung berücksichtigen konnte (MAE = 0,36, RMSE = 0,49, $R^2 = 0,87$).

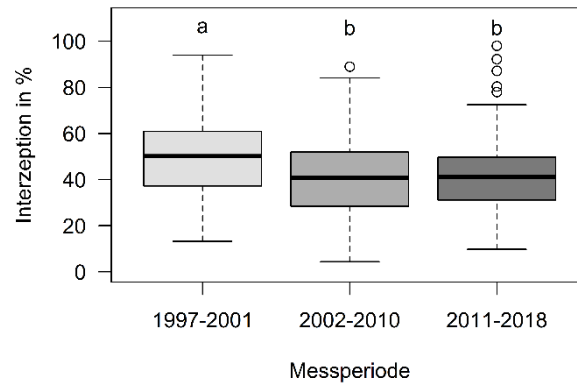


Abb. 2: Vergleich des Interzeptionsanteils in % für die drei Messperioden; nur für Ereignisse bei denen der Bruttoniederschlag die Sättigungsmenge (4,53 mm) übersteigt; a ist signifikant verschieden von b.

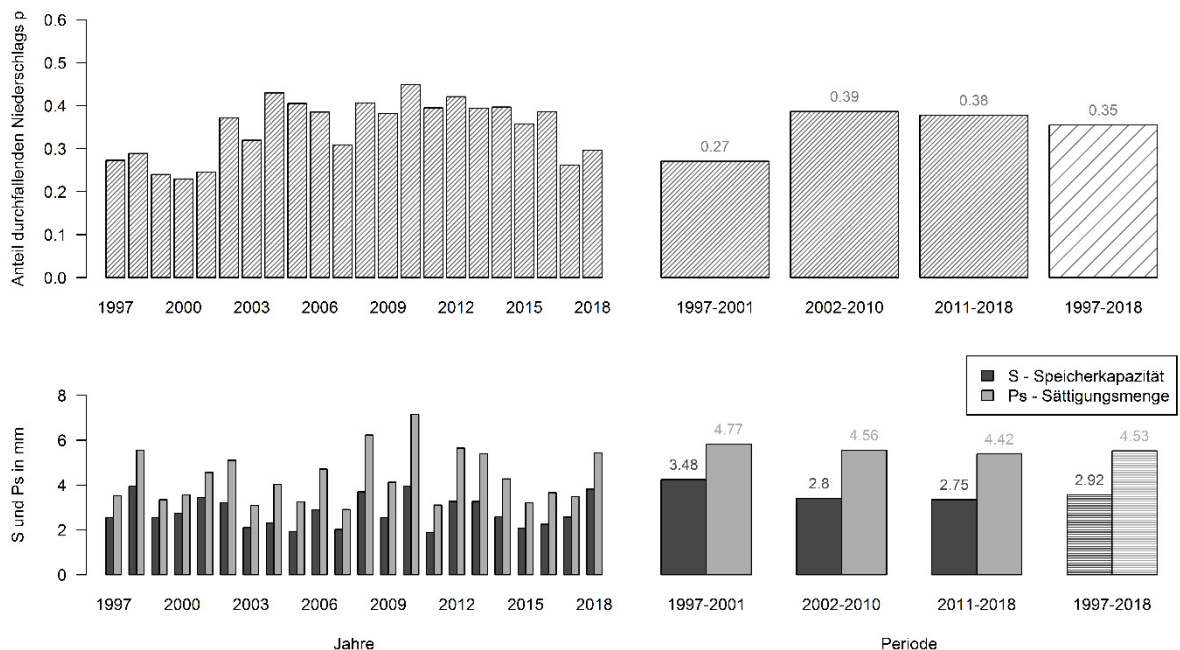


Abb. 3: Aus Regressionsanalysen ermittelte Bestandesparameter, oben: p, unten: S und Ps, Grafiken zur Linken zeigen Einzeljahre, rechts Perioden und ganz außen der Gesamtzeitraum,

Tab. 1: Modellgüte für die erstellten Regressionsmodelle unter Nutzung der Parameter berechnet für den Gesamtzeitraum, die drei Perioden und Einzeljahre.

	MAE	RMSE	R^2
<i>Gesamtzeitraum</i>	0,37	0,50	0,86
<i>3 Perioden</i>	0,36	0,49	0,87
<i>Einzeljahre</i>	0,43	0,70	0,83

4. Diskussion

Die zwei Durchforstungen und die damit einhergehende Auflichtung des Bestandes hatten einen Einfluss auf den Anteil interzeptierten Niederschlags. Die Bestandesparameter S und P_s nahmen mit jeder Durchforstung ab. Ein signifikanter Unterschied im Interzeptionsanteil konnte nur nach der ersten Durchforstung festgestellt werden. Der Effekt der zweiten Durchforstung wurde möglicherweise durch strukturbedingte Änderungen im Mikroklima überlagert, z.B. könnte eine erhöhte Verdunstung durch eine bessere Belüftung des Bestandes die Interzeption erhöht haben, obwohl die Speicherkapazität geringer wurde. Solche komplexen Wirkungszusammenhänge können nur mit hochaufgelösten Prozessmodellen näher untersucht werden.

Die Verwendung von Parametern, die den Gesamtzeitraum repräsentieren, erzeugte realistische Modellergebnisse. Eine Verbesserung der Modellgüte konnte erreicht werden, wenn unterschiedliche Parametersätze für die Perioden vor und nach den Durchforstungen verwendet wurden. Die Verwendung von Parametern, die auf Basis von Einzeljahren oder einzelnen Vegetationsperioden berechnet wurden, ist hingegen nicht zu empfehlen.

Generell hängt die Verlässlichkeit der Bestandesparameter von der Länge des Datensatzes ab, der für die Analyse benutzt wurde. Dennoch erzeugten die Parameter für die einzelnen Perioden die beste Modellgüte, verglichen mit den Parametern des Gesamtzeitraumes oder für Einzeljahre. Dies zeigt deutlich, dass die Modellgüte von statistischen Interzeptionsmodellen von einer verlässlichen Parametrisierung der Bestandesveränderungen abhängt.

Literatur

- ARNELL, N. W. (2002): Hydrology and Global Environmental Change. Internet: <http://www.pearsoned.co.uk/Bookshop/detail.asp?item=100000000006246> (26.11.2015).
- BREDA, N. J. J. (2003): Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. In: *Journal of Experimental Botany* 54 (392): 2403–2417.
- CROCKFORD, R. H. und D. P. RICHARDSON (2000): Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate. In: *Hydrological Processes* 14 (16–17): 2903–2920.
- GHIMIRE, C. P., L. A. BRUIJNZEEL, M. W. LUBCZYNSKI und M. BONELL (2012): Rainfall interception by natural and planted forests in the Middle Mountains of Central Nepal. In: *Journal of Hydrology* 475: 270–280.
- JACKSON, I. J. (1975): Relationships between rainfall parameters and interception by tropical forest. In: *Journal of Hydrology* 24 (3–4): 215–238.
- LEYTON, L., E. R. C. REYNOLDS und R. B. THOMPSON (1967): Rainfall interception in forest and moorlands. In: (1967): *Forest Hydrology*. Oxford: 163–178.
- LINK, T. E., M. UNSWORTH und D. MARKS (2004): The dynamics of rainfall interception by a seasonal temperate rainforest. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 124 (3–4): 171–191.
- ROTHACHER, J. (1963): Net precipitation under a Douglas-fir forest. In: *Forest Science* 9 (4): 423–429.

Auswirkungen der systematischen Unterschätzung von Niederschlagsextremwerten der DX-Radardaten

Markus Jessen, Thomas Einfalt

Zusammenfassung

Für hydrologische Anwendungen oder Starkregenuntersuchungen werden verlässliche und räumlich hochaufgelöste Niederschlagsinformationen benötigt, die durch Kombination von Wetterradar- und Regenschreiberdaten bereitgestellt werden können.

Seit dem Jahr 2000 stehen Radardaten des Deutschen Wetterdienstes in Form des DX-Produktes und seit 2008 in Form des Sweep-Produktes im BUFR-Format an Radarstandorten zur Verfügung.

Am Beispiel vom Radar Essen weist die Auftretenshäufigkeit der Reflektivitätswerte (dBZ-Werte) Unterschiede zwischen den beiden Produkten auf.

Hohe dBZ-Werte treten bei dem DX-Produkt deutlich seltener auf als bei dem BUFR-Produkt, so dass das DX-Produkt hohe Niederschlagsintensitäten systematisch unterschätzt.

Das extremwertstatistische Verhalten wurde auf Basis von fehlerkorrigierten und mit Niederschlagszeitreihen angeeichten DX- und BUFR-Sweep-Daten anhand der partiellen Serien mit den jeweils 10 höchsten Werten der Dauerstufen von 5 bis 120 Minuten analysiert. Es ließ sich feststellen, dass hohe Niederschlagsmengen kurzer Dauerstufen durch BUFR-Sweep-Daten besser als durch DX-Daten gegenüber Vergleichswerten aus Regenschreibern repräsentiert werden.

Die systematische Unterschätzung von Extremwerten im DX-Produkt sollte bei Niederschlagsauswertungen und Starkregenanalysen Berücksichtigung finden.

1. Eingangsdaten

Für die Untersuchung standen Radardaten in Form des DX-Produktes und des Sweep-Produktes im BUFR-Format (im weiteren BUFR-Sweep-Produkt) sowie 1085 Regenschreiberdaten im Bereich des Radarstandortes Essen im Zeitraum 01.01.2018 bis 31.08.2018 zur Verfügung.

Das DX-Produkt hat dabei folgende Kenngrößen:

- Reichweite: 128 km
- Räumliche Auflösung: 1 km / 1°
- Pixelanzahl: 46080
- Zeitliche Auflösung: 5 min
- Niederschlagsscan

Die Kenngrößen des Sweep-Produktes im BUFR Format sind:

- Reichweite: 150 km
- Räumliche Auflösung: 250 m / 1°
- Pixelanzahl: 216000
- Zeitliche Auflösung: 5 min
- Niederschlagsscan

Zur Aneicherung der Radardaten sind Zeitreihen von Niederschlagsstationen unumgänglich. Um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurden Regenschreiberzeitreihen im Bereich der DX-Radarabdeckung (Radar Essen) von 128 km verwendet, dies umfasst 1085 Zeitreihen.

2. Datenaufbereitung

2.1 Radardaten

Sowohl das DX-Produkt wie auch das BUFR-Sweep-Produkt werden direkt am Radarstandort erstellt und sind noch mit Fehlern behaftet. Auftretende Störungen können beispielweise Bodenechos aber auch Strahlabschattungen oder die bei hohen Niederschlagsintensitäten auftretenden Dämpfungseinflüsse sein.

Da die verwendeten Radarbilder Momentaufnahmen in einem Abstand von 5 Minuten sind, können bei der Summierung von schnellziehenden Regenzellen auf der Zugbahn sowohl zu niedrige wie auch zu hohe Niederschlagsmengen erzielt werden. Um diese Probleme insbesondere bei der Aneicherung zu minimieren, wurde eine Bildinterpolation der 5-Minuten-Bilder (Advektionskorrektur) mit Hilfe von Zelltracking (Jasper-Tönnies & Jessen, 2014) durchgeführt. Die aufgeführten Fehlerquellen hatten einen erheblichen Einfluss auf die korrekte Ermittlung der Niederschlagsmengen und wurden bei beiden zur Verfügung stehenden Produkten weitestgehend korrigiert. Die Ergebnisse sind für das BUFR-Sweep-Produkt in den Abbildungen 1 und 2 dargestellt.

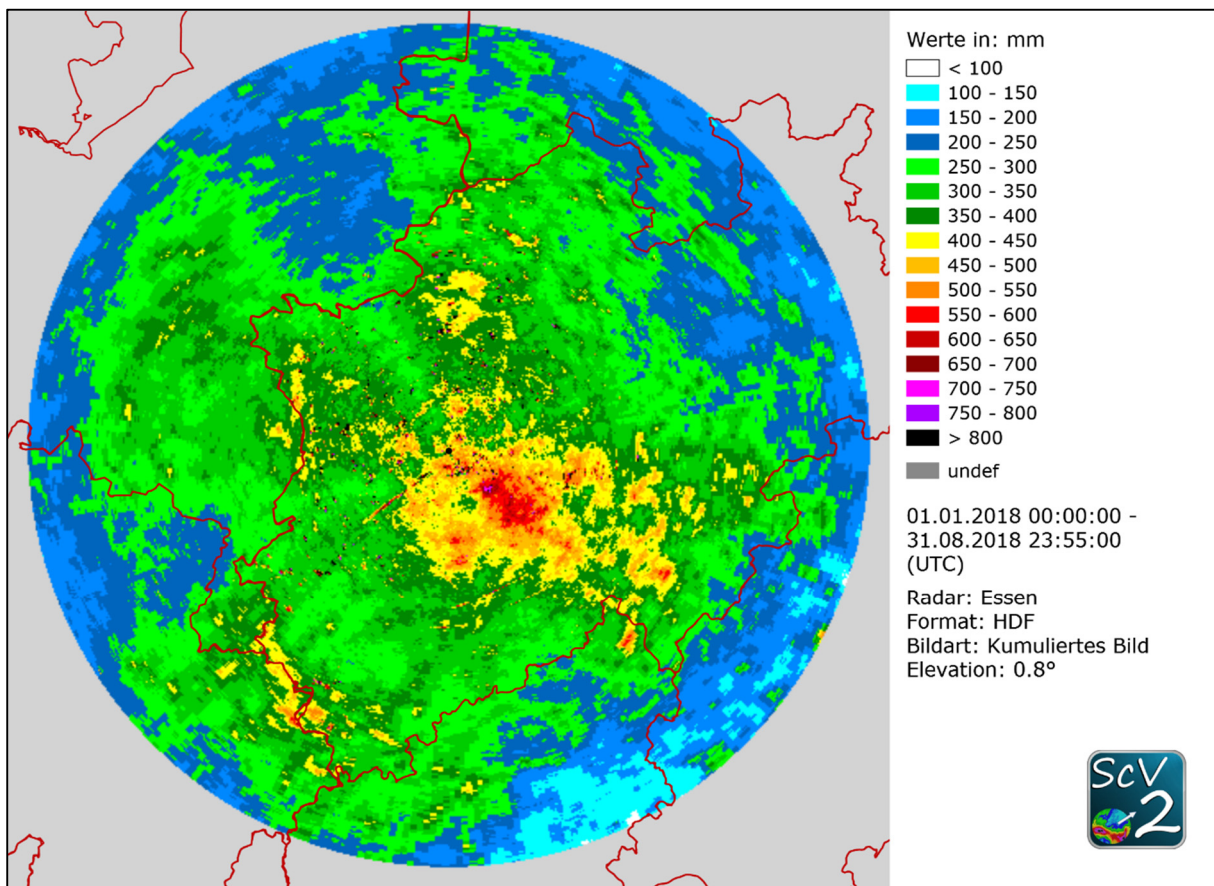


Abb. 1: Radarsummenbild auf Basis von unkorrigierten BUFR-Sweep Radarbildern des Radarstandortes Essen

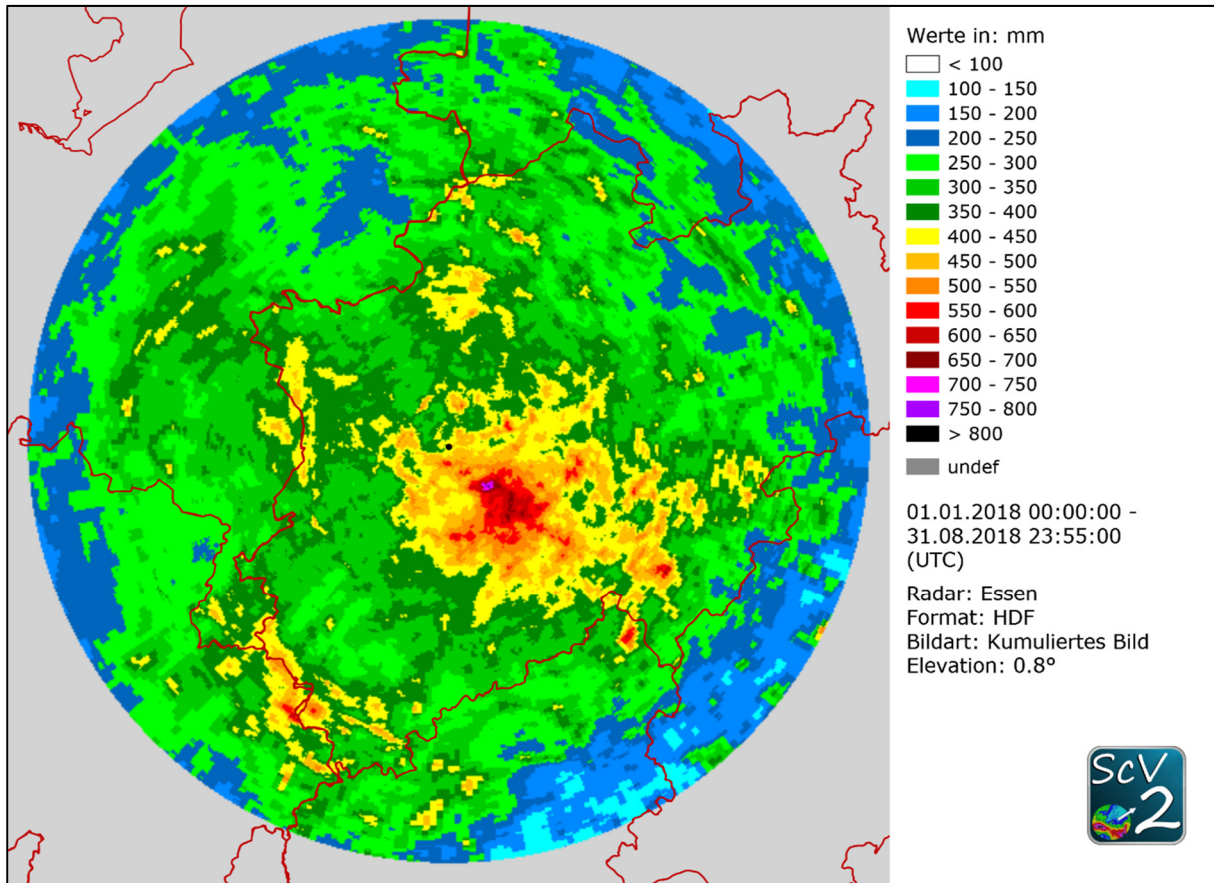


Abb. 2: Radarsummenbild auf Basis von korrigierten BUFR-Sweep Radarbildern des Radarstandortes Essen

2.2 Regenschreiber

Auf Basis der verfügbaren Regenschreiber wurde eine detaillierte Datenprüfung mit Nachbarstationen und der jeweiligen Radarzeitreihe am Regenschreiberstandort vorgenommen.

Die Analyse und Berechnungen basieren auf Originaldaten. Bei Verwendung von aufbereiteten Daten würden mengenmäßige Unsicherheiten am Regenschreiberstandort entstehen, die die Güte der Aneichung z.T. deutlich beeinträchtigen können.

Bei unsicheren bzw. fehlerhaften Zeiträumen (fehlender Niederschlag, Verstopfung etc.) wurden die entsprechenden Abschnitte nicht für die Aneichung verwendet, da diese eine hohe Qualität der Messdaten voraussetzt. Zeitverschiebungen hingegen wurden korrigiert.

2.3 Aneichung

Anhand der korrigierten BUFR-Sweep bzw. DX-Daten sowie der korrigierten Niederschlagszeitreihen fand eine Aneichung mittels Bodenmessungen statt. 889 Niederschlagszeitreihen wurden hierfür verwendet, die 196 weiteren Zeitreihen dienen zur Verifikation der Ergebnisse. Als Verfahren für die Aneichung von BUFR-Sweep und DX Radardaten wurde eine Kombination aus einem tageweise erstellten Faktorenfeld (nach Wilson und Brandes, 1979) und einem tageweise erstellten Differenzenfeld für geringe Niederschlagsmengen ($< 4\text{ mm / Tag}$) verwendet (Jessen, Einfalt und Frerk, 2018). Grundlage für den Faktor bzw. die Differenz bildeten das jeweilige Radarpixel am Regenschreiberstandort.

Die Güte der Aneichung wurde anhand der Kriterien Gesamtmengen, Tagesmengen und Tageswertdifferenzen an den Verifikationsstationen überprüft. Dabei konnte festgestellt werden, dass BUFR-Sweep-Daten vergleichbare Ergebnisse gegenüber den DX-Daten liefern.

Die Niederschlagsmengen des Untersuchungszeitraumes sind für die beiden Produkte in den Abbildungen 3 und 4 gegenübergestellt.

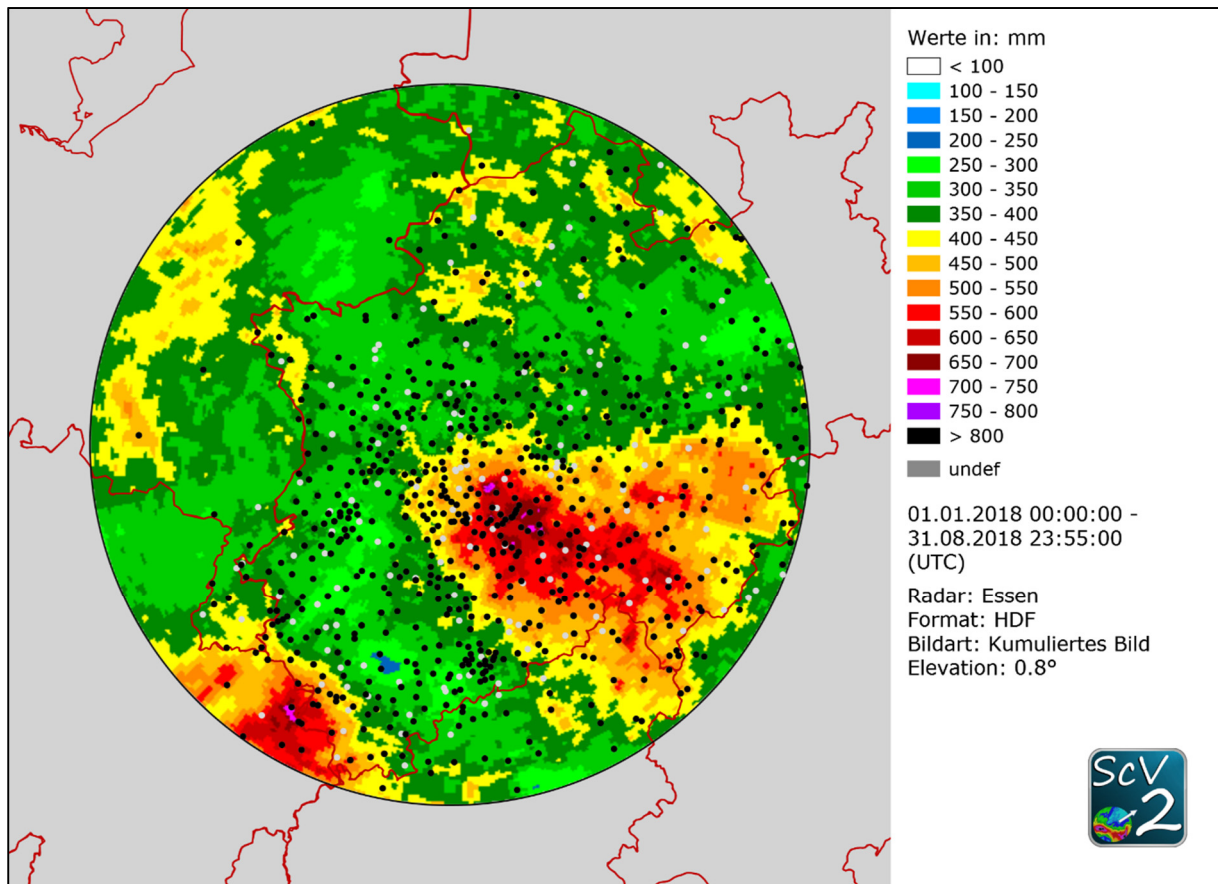


Abb. 3: korrigiertes und angeeichtes Radarsummenbild aus DX Daten (schwarze Punkte = Aneichstationen; hellgraue Punkte = Verifizierstationen; schwarzer Kreis = 128 km Radius)

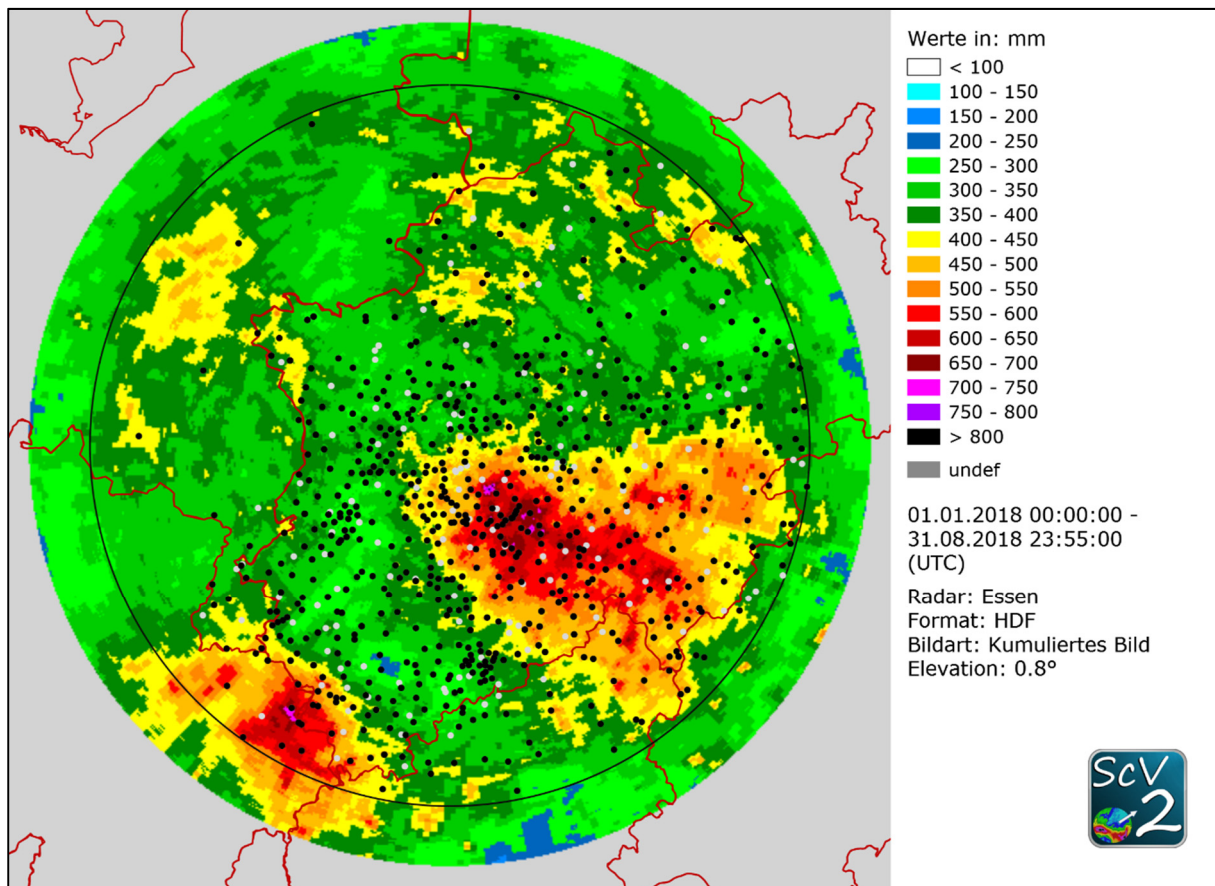


Abb. 4: korrigiertes und angeeichtes Radarsummenbild aus BUFR-Sweep Daten (schwarze Punkte = Aneichstationen; hellgraue Punkte = Verifizierstationen; schwarzer Kreis = 128 km

3. Auswertungen

3.1 Auftretenshäufigkeit von dBZ – Werten

Um die Vergleichbarkeit von DX-Produkt und BUFR-Sweep-Produkt abzuschätzen, ist die Auftretenshäufigkeit der Reflektivitätswerte (dBZ-Werte) ein wichtiges Kriterium. Grundlage für diese Untersuchung bildeten die unkorrigierten DX- und BUFR-Sweep-Daten im Zeitraum 01.01.2018 – 31.08.2018. Dabei werden die BUFR-Pixel nur bis 128 km herangezogen und auf die Gesamtpixelanzahl der DX-Daten normiert.

Anhand der Untersuchung lässt sich erkennen, dass die Auftretenshäufigkeit der dBZ-Werte ab 45 dBZ bei den DX-Daten niedriger ist als bei den BUFR-Daten, so dass Extremwerte im Starkregenbereich bei diesem Produkt deutlich seltener auftreten wie aus Abbildung 5 ersichtlich wird. Die niedrigen dBZ-Werte überwiegen hingegen bei den DX-Daten.

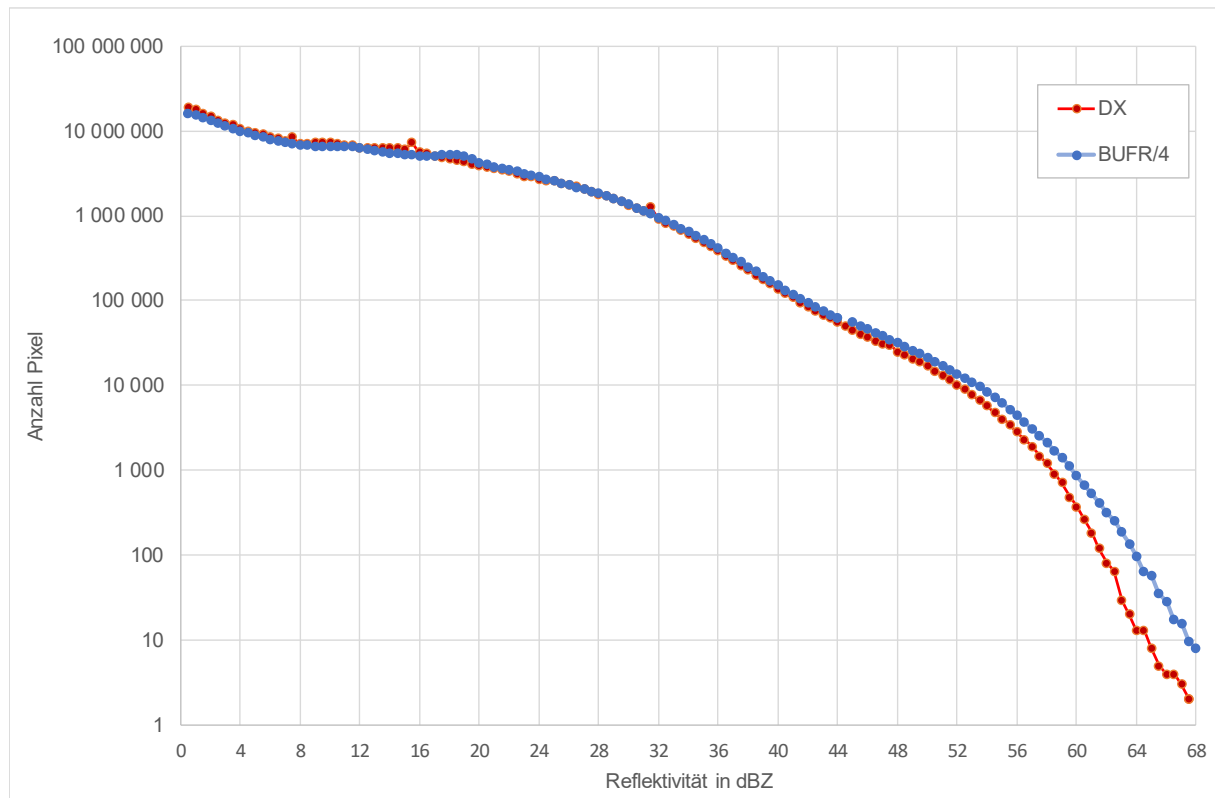


Abb. 5: Histogramm der Reflektivitätswerte (dBZ-Werte) für den Gesamtzeitraum in logarithmierter Form (rot = DX-Produkt, blau = BUFR-Sweep-Produkt)

3.2 Auswertung partielle Serien

Für die hydrologische Modellierung spielt das extremwertstatistische Verhalten der angeeichten Radardaten eine besondere Rolle. Anhand der partiellen Serien mit den jeweils 10 höchsten Werten der Dauerstufen 5 / 15 / 30 / 60 / 120 Minuten wurde dieses Verhalten für den Zeitraum 01.01.2018 – 31.08.2018 untersucht. Eine Extremwertstatistik ist aufgrund des kurzen Untersuchungszeitraumes unzuverlässig.

Die Grundlage für diese Untersuchung bildeten die angeeichten BUFR-Sweep- und DX-Daten im Vergleich mit den 481 korrigierten und kontinuierlich messenden Regenschreiberzeitreihen, die eine Datenverfügbarkeit von mindestens 97% aufwiesen.

In Abbildung 6 sind beispielhaft für die Dauerstufe 15 Minuten Niederschlagsmittelwerte der jeweiligen gleichen statistischen Ränge von Regenschreiber, BUFR-Sweep und DX gegenübergestellt.

In Abbildung 7 findet sich eine Zusammenfassung aller 10 Ränge und die Gegenüberstellung der Dauerstufen.

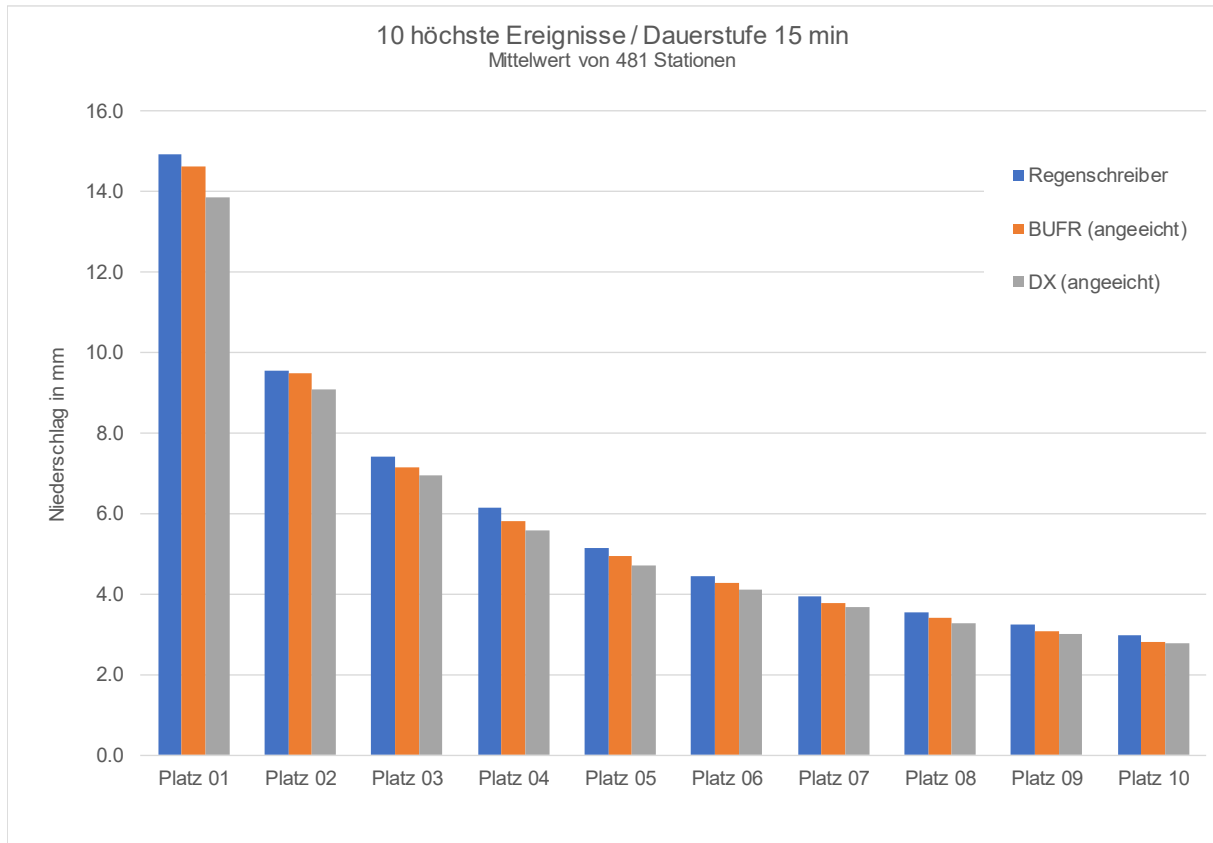


Abb. 6: Mittelwerte (aller Stationen) der 10 höchsten Ereignisse der Dauerstufe 15 Minuten für Regenschreiber (blau), BUFR-Sweep (orange) und DX (grau)

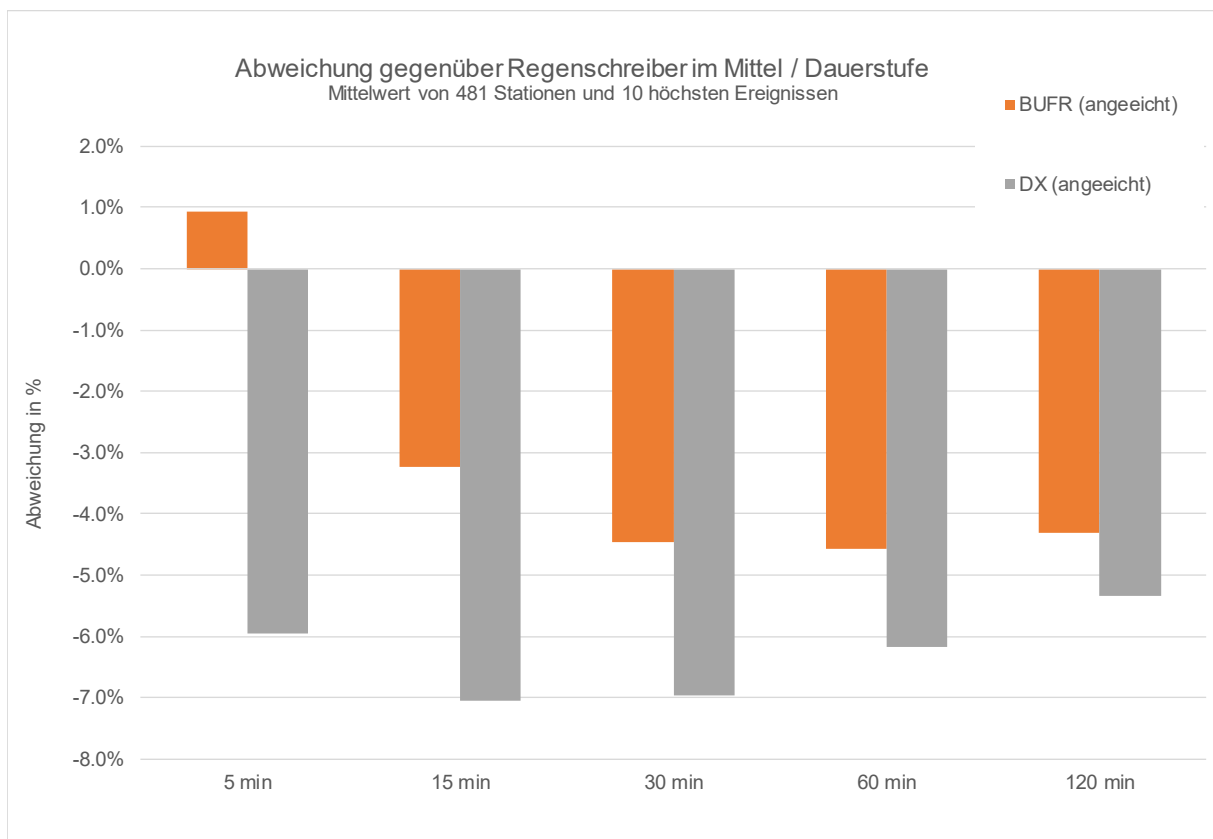


Abb. 7: prozentuale Abweichung von BUFR-Sweep (orange) und DX (grau) gegenüber Regenschreiber (Mittelwerte der 10 höchsten Ereignisse und aller Stationen) nach Dauerstufe. Bei der Betrachtung der partiellen Serien lässt sich feststellen, dass hohe Niederschlagsmengen kurzer Dauerstufen durch angeeichte BUFR-Sweep-Daten besser als durch angeeichte DX-Daten repräsentiert werden. Mit zunehmender Dauerstufe verringert sich dieser Effekt allerdings.

Es ist aber davon auszugehen, dass der Unterschied in der Extremwertstatistik zwischen BUFR-Sweep-Daten und Regenschreibern deutlich geringer ausfallen wird als der Unterschied zwischen DX-Daten und Regenschreibern.

3.3 Auswirkung dBZ-Mittlung der DX-Daten

Das DX-Produkt entspricht auf jedem 1km-Pixel weitestgehend einer Mittelung der vier dBZ-Werte der entsprechenden 250m-Einzelpixel des BUFR-Sweep-Produktes. Reflektivitäten stehen in einer nichtlinearen Beziehung zu Niederschlagsintensitäten. Die Mittelung der Einzelpixel über dBZ führt bei der Umrechnung der so gemittelten Reflektivitäten in Intensitäten zu einer systematischen Unterschätzung der so berechneten Niederschlagsintensitäten gegenüber dem Mittel der an den Einzelpixeln erzielten Intensitäten.

Beispielhaft ist dies anhand von ausgewählten Radarpixeln am 01.06.2018 04:10 Uhr UTC in Tabelle 1 aufgezeigt.

Tab. 1: Ergebnisse bei Mittelung der Intensitäten und Reflektivitäten (Beispiel 01.06.2018 04:10 Uhr UTC). Werte sind den unkorrigierten BUFR- bzw. DX-Radardaten entnommen.

Koordinate DX		Wert BUFR				Mittelwert BUFR	Wert DX	Einheit
[Abstand]	[Winkel]							
52	113	0	1.5	6.5	9.5	4.4	4	dBZ
		0.04	0.05	0.09	0.14	0.08	0.06	mm/h
51	118	56.5	56.5	52	51	54.0	53.5	dBZ
		123.91	123.91	64.84	56.15	92.20	80.46	mm/h
45	123	57.5	60.5	60	57	58.8	58.5	dBZ
		143.09	220.35	205.05	133.15	175.41	165.24	mm/h
41	124	22.5	29.5	34.5	35.5	30.5	30.5	dBZ
		0.93	2.54	5.23	6.03	3.68	2.94	mm/h
41	123	9.5	17.5	26	28	20.3	20.5	dBZ
		0.14	0.45	1.54	2.05	1.05	0.70	mm/h

Das bedeutet, dass das DX-Produkt Niederschlagsmengen auf der Fläche eines Pixels systematisch unterschätzt. Diese Unterschätzung ist umso höher, je heterogener der Niederschlag innerhalb des Pixels gefallen ist. Nur bei exakt identischen Reflektivitäten aller vier Teilpixel entspricht der Wert des DX-Pixels dem Mittelwert der BUFR-Pixel in dBZ und in mm/h.

4. Fazit

Eine wesentliche Erkenntnis der Untersuchungen ist, dass es durch die dBZ-Mittlung der Ursprungswerte eine systematische Unterschätzung von Extremwerten im DX-Produkt gibt, wie sich im Vergleich mit den höher aufgelösten BUFR-Sweep-Daten erkennen lässt. Dies

zeigt sich sowohl in der Auftretenshäufigkeit hoher dBZ-Werte wie auch in der Untersuchung der partiellen Serien kurzer Dauerstufen.

Insbesondere bei der Analyse und der hydrologischen Modellierung von kleinräumigen heterogenen Starkregenereignissen sollte den BUFR-Sweep-Daten der Vorzug gegenüber dem DX-Produkt gegeben werden, um eine Unterschätzung von hohen Starkregen- und Abflusserignissen zu vermeiden.

Literatur

Wilson, J.W. und Brandes E.A. (1979). Radar measurement of rainfall – A summary, American Meteorological Society, 60, 1048-1058

Jessen, M., Einfalt, T.; Frerk, I.; Improvement of the adjustment procedure on a long-term radar data set // ERAD Proceedings. - Ede-Wageningen: ERAD, 2018.

Jasper-Tönnies, A., Jessen, M., 2014: Improved radar QPE with temporal interpolation using an advection scheme // ERAD Proceedings. Garmisch: ERAD, 2014.

How and why to walk the bridge between the social and the natural Human-water perspectives from above and below the ground

Karen Lebek, Theresa Frommen, Tobias Krüger

Summary

On different scales, water crises and problems are a result of highly dynamic and interacting hydrological, social, technical and political processes. Social and hydrological systems are deeply intertwined. In our case studies, we have gained experience in using methods and concepts from social sciences. In a case study from India, Theresa Frommen used a transdisciplinary and participatory approach. She worked with local partners and assessed groundwater quality together with local women. In South Africa, Karen Lebek investigated rural household water insecurity and the way it is shaped by municipal services. She collected data through questionnaires, interviews and meetings.

1. Introduction

In recent years, there has been a growing interest among hydrologists and hydrogeologists in social aspects of water research. Socio-hydrology and socio-hydrogeology aim for a better understanding of coupled human-water systems. Hydrologists who integrate a human component into their field studies and modeling, regard human agency as important for understanding the water cycle. We as natural scientists are beginning to understand the spatial-temporal complexity and dynamics that humans bring to our systems and models. In the social sciences, in contrast, there is a much longer tradition of seeing water as both natural and social. For analyzing human-water relations, humans are not regarded as a separate part of the water cycle. Instead, water and humans are deeply intertwined. They shape and reshape each other in a continuous hydro-social cycle. From our experience, interdisciplinary and transdisciplinary research and collaboration is essential for tackling current and future environmental problems and crises on all spatial scales.

Together with a collaborative group of hydrologists and social scientists, we recently submitted an opinion paper to a special issue of the Hydrological Sciences Journal, titled "Social science for hydrologists: Facilitating collaborative and interdisciplinary field work". With this paper, we encourage hydrologists to bridge the gap between natural and social scientists and engage in truly interdisciplinary collaboration with social scientists across a research project. We introduce a range of key concepts and methods from the social sciences that are useful to hydrologists when working in an interdisciplinary research project or alternatively collecting data with human participants in the field on their own. Key methods include data collection methods such as questionnaires, interviews, focus groups, games and participatory research methods, communicating science in the field and post-fieldwork reflections. Key concepts discussed in the paper include ethical principles and considerations, power dynamics and positionality and the importance of partnerships with local partners such as NGO's. Where possible, hydrologists should not employ social science methods in the field on their own, but strengthen their research by collaborating with social scientists.

2. Case Studies

2.1. India

The case study in India was part of the project „Women's Action towards Climate Resilience for Urban Poor in South Asia" under the lead of the Indian organization Mahila Housing SEWA Trust (MHT). The project aimed at empowering women from slums in South Asian cities to act

against the most pressing climate-related risks: heat waves, flooding, water scarcity and water and vector borne diseases. The highly interdisciplinary team included experts in urban planning, social sciences, urban health systems, insurance, communication and water sciences. Access to clean water is a key factor in enhancing the resilience of slum dwellers against the consequences of climate change, e.g. temperature rise, water- and vector-borne diseases and droughts (Groenwall et al., 2010). However, a significant share of slum dwellers in India does not have access to a safe water source.

For socio-hydrogeological studies, we selected two low-income communities of Jaipur as pilot case studies. MHT had already established women community groups in both of them. Both areas are situated in the peri-urban fringe and are characterized by an insufficient water supply both in terms of quality and quantity. Working with the MHT women's network had important advantages for the field work. Local communities and research participants strongly supported and accepted the research project from the start. This is crucial for a successful and long-term field work. The MHT women contributed to the research with their detailed, local detailed knowledge of their area related problems. Collaborating with the MHT leader gave the opportunity to work with some of the most engaged and understanding women in the area.

In 2015, Re (2015) defined socio-hydrogeology "as a discipline that embeds the social dimension into hydrogeological and hydrogeochemical investigations". This can happen in different ways. In the Indian case study, it was crucial to include the local women into the work, as they are responsible for the daily water supply for their households. Therefore, we developed a participatory approach including three main steps – awareness raising and basic knowledge transfer, capacity development and active involvement, evaluation and upscaling. This approach was during a 1.5-year field research in Jaipur.

Water workshops were the first activity. They served as a tool to create basic awareness and knowledge about groundwater among a broad group of people, many of whom were dealing with groundwater every day without understanding basic hydrogeological processes. However, such understanding was important for measures that require behavioral change to be implemented at a later stage. Use of interactive tools was central to the workshops. They helped to transfer knowledge and, at the same time, keep the motivation and concentration of the participants at a high level. The second step was active involvement of locals, which formed the next level of participation. The main aim was to develop and implement a groundwater monitoring plan together with the women community leader and to train women in groundwater monitoring. We found that local women were generally able to carry out the mapping independently after a well-founded introduction. They had no problems to follow the instructions given in a step-by-step guideline for taking water samples. Especially at the beginning, it was, however, a very time intensive process for both sides – for the local women as well as for the "water expert".

The main overarching goal of the participatory work was to achieve sustainable outputs. As common ways of scientific communication would not reach the target groups of the project (local communities, NGOs, water experts), we decided on an innovative communication approach - a transdisciplinary collaboration with a documentary filmmaker, which led to the production of one cinematic documentation and one short educational movie. The films enable the upscaling of the project's impact by transferring the results to other places. Furthermore,

the filmic approach has influenced the project itself and generated knowledge which otherwise would not have been detected. It enabled a novel way of evaluating the project (Frommen & Ambrus, 2019).

We identified three challenges that we faced throughout the research. The most challenging part of the participatory and interdisciplinary approach was communication. The broad variety of actors caused communication barriers on different levels, from language and cultural barriers, over educational barriers to institutional barriers. The second main challenge was the understanding common people have of groundwater. During the water workshops, we asked women to draw how they imagine the underground including groundwater. Many women imagined and drew a groundwater lake or river, an enormous reservoir of water in the underground. Groundwater was a hidden resource to research participants. One of the problems arising from this wrong perception was the expectation that the hydrogeologist as a so-called “water expert” can solve *all* groundwater problems. Thirdly, differences in practices were a challenge for the participatory hydrogeological approach.

The results of this case study add new knowledge to the expanding field of participatory and socio-hydrogeological research in groundwater management and show that this approach can contribute to a raising awareness of groundwater among local population as well as NGOs working in the field of water management.

2.2 South Africa

Despite an aspirational water legislation and policy, and ongoing water infrastructure development on the ground, the majority of rural households in Kwazulu-Natal struggle for access to safe drinking water every day. The questions arise, to which degree municipal water services have succeeded in improving water security for households, and why water services have failed in many cases. In our case study, we grouped households according to their primary water source (streams / springs / rivers, public standpipes, illegal yard taps). We quantitatively and qualitatively compared these groups in terms of their household water insecurity (HWI). The study area is a rural area under tribal authority in Kwazulu-Natal. Upstream of the study area, surface and groundwater are impacted by large areas of timber plantations (Lebek et al., 2019). We chose this study area because of water limitation issues and infrastructure-related conflicts over water in the area.

During a first field trip in 2014, Lebek attended meetings and carried out interviews with a variety of water users, municipal and traditional leaders and attended different meetings. To tackle the questions on factors for household water insecurity that had emerged in the first field phase, we designed a household survey on HWI for further research. During a second four-week field stay in January 2018, we conducted the survey with 67 households. We worked in two teams of one researcher and one translator each. The survey included items household characteristics, water source, water availability and reliability, water quality, health and productivity of household members. We complemented responses to the survey items with photos (e.g. of containers) and further interview questions. We later used these to verify and supplement responses and to fill in missing data. The second field trip further served to conduct interviews with decision makers and the local NGO representative and attend meetings. Most importantly, we participated in a large community meeting on conflicts over water within the study area.

We found differences in HWI among the three different groups of water users. In material terms, users of standpipes are generally highly water insecure in terms of water availability, and users of informal water sources are generally water insecure in terms of water quality and water-related health. Municipal water services have so far only succeeded in an overall improvement of water security for users of illegal yard taps. Adding to the material dimension of water security, our relational approach to household water security with a focus on the dynamics of hydro-social relations has yielded valuable insights into the driving factors and underlying hydro-social causes of HWI in the study area. Overall, municipal water services have failed to address water problems and substantially reduce household water insecurity in our case study. Instead, they have reconfigured hydro-social relations and thereby produced uneven power relations leading to unequal access to safe water. A hydro-social perspective on HWI calls into question supply-oriented and purely hydrological interventions that disrupt and reconfigure hydro-social relations at the community level.

3. Conclusion

In both our case studies, working with concepts and methods from the social sciences have deepened our understanding of the interconnectedness of hydrological and social systems and processes. Our research with human participants has yielded insights on underlying factors for water problems in and beyond the study areas. We therefore encourage hydrologists and hydro-geologists to walk the bridge between the social and the natural and work in interdisciplinary and transdisciplinary ways.

Literature

- Frommen, T. & Ambrus, K., 2019. *Pani Check & Pani Doctors - A documentary film project about an interdisciplinary hydrogeological project in Jaipur, India*. Lernpapier. Andrea von Braun Stiftung - voneinander wissen. München.
- Groenwall, J. T., Mulenga, M. & McGranahan, G., 2010. *Groundwater, Self-supply and Poor Urban Dwellers: A Review with Case Studies of Bangalore and Lusaka*. London, UK: International Institute for Environment and Development (IIED).
- Lebek, K., Senf, C., Frantz, D., Monteiro, J.A.F., Krueger, T., 2019. Interdependent effects of climate variability and forest cover change on streamflow dynamics: a case study in the Upper Umvoti River Basin, South Africa. *Regional Environmental Change*, 19(7), 1963–1971. doi: <https://doi.org/10.1007/s10113-019-01521-8>
- Lebek, K., Twomey, M., Krueger, T.: *Municipal water services do not reduce water insecurity for rural households in Kwazulu-Natal, South Africa* (under review)
- Rangecroft, S., Rohse, M., Banks, E.W., Day, R., Di Baldassarre, G., Frommen, T., Hayashi, Y., Höllermann, B., Lebek, K., Mondino, E., Rusca, M., Wens, M., Van Loon, A.F.: *Social science for hydrologists: Facilitating collaborative and interdisciplinary field work* (under review)
- Re, V., 2015. Incorporating the social dimension into hydrogeochemical investigations for rural development: the Bir Al-Nas approach for socio-hydrogeology. *Hydrogeology Journal*, 23(7), 1293-1304. doi:10.1007/s10040-015-1284-8.

Gemeinsamkeiten und Unterschiede fluvialer Schwebstoffe im Gewässerverlauf eines kleinen, urban geprägten Einzugsgebiets

Berenike Meyer, Sabine Keßler, Reinhard Bierl, Tobias Schütz

Zusammenfassung

Die anthropogene Überprägung von Fließgewässern wirkt sich auf deren Struktur, die Abflussdynamik und nicht zuletzt den gelösten und partikulären Stofftransport aus. Vor allem mit siedlungsinduzierten Abflüssen an Regenwettertagen gelangen Feststoffe in die Gewässer, die mit dem System im ständigen Austausch stehen und einer stetigen Veränderung unterliegen. Die Ergebnisse der vorliegenden Studie zeigen inwiefern sich Schwebstoffe, ihre Eigenschaften und ihre stoffliche Beladung im Gewässerverlauf eines mesoskaligen Einzugsgebiets im Mittelgebirge verändern. Dabei zeigt sich in den Korngrößenanteilen (KGA) im Hauptgewässer ein mit den Abflüssen gleichsinniger Jahresgang, der in den Schwebstoffen der Zuflüsse nicht ausgeprägt zutage tritt. Die chemischen Eigenschaften zeigen weder einen klaren Jahresgang (bspw. Zusammenhang mit den KGA) noch eine signifikante Belastungszunahme mit steigendem Siedlungsanteil bzw. zunehmender anthropogener Überprägung der Zuflüsse.

1. Einleitung und Zielsetzung

Schwebstoffe und deren stoffliche Veränderung in Gewässern mesoskaliger Einzugsgebiete sowie deren Überprägung durch Zuflüsse aus kleinen Teileinzugsgebiete sind nur selten Bestandteil längerfristigen Monitorings. Dabei können die Tributäre, gerade bei erhöhtem Siedlungsanteil, nicht unerheblich zur Belastung der Gewässer beitragen. So haben Meyer et al. (2013) anhand von Chemodynamiken im Hochwasserabfluss des Olewiger Bachs und überprägten Teileinzugsgebiete anthropogene Abflusskomponenten und deren stoffliche Muster identifiziert und die gelösten Komponenten im Verlauf des Hauptgewässers nachgewiesen. Diese daran anknüpfende Studie untersucht, inwiefern sich in dem Gewässer die Schwebstoffe und ihre chemisch-physikalischen Eigenschaften durch anthropogene Zuflüsse aus der Niederschlagswasserbewirtschaftung verändern.

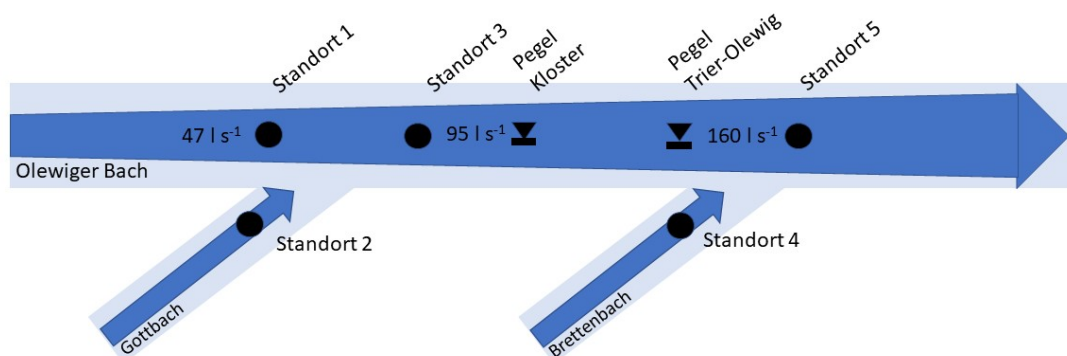


Abb. 1: Schematische Darstellung des Olewiger Baches mit Probenstandorten im Hauptgewässer und den Zuflüssen.

2. Untersuchungsgebiet

Der Olewiger Bach hat sich im Süden der Stadt Trier in das devonische Grundgestein eingetieft. Am Pegel Trier-Olewig ($A_{EO} 24,6 \text{ km}^2$) beträgt der mittlere Abfluss ca. $0,2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (vgl.

Abbildung 1), die mittlere Jahresniederschlagssumme liegt bei 719 mm (1961-1990). Zum Zeitpunkt der Studie bestanden 24 wasserrechtliche Genehmigungen für Einleitungen an Regentwetertagen (insgesamt $13 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Die beiden untersuchten Tributäre Gottbach ($A_{EG} 6,3 \text{ km}^2$) und Brettenbach ($A_{EB} 2,3 \text{ km}^2$) unterscheiden sich vor allem hinsichtlich des vorherrschenden Niederschlagswassermanagements der Stadtteile. Im Einzugsgebiet des Gottbachs entwässern konventionelle Mischwassersysteme in das Gewässer, wohingegen im Brettenbach mittels modifizierter Trennsysteme naturnah bewirtschaftet wird. Detaillierte Beschreibungen beider Einzugsgebiete finden sich in Meyer et al. (2013) und Keßler et al. (2017).

3. Material & Methoden

Die Schwebstoffe des Olewiger Baches wurden an drei Standorten im Hauptgewässer und in zwei Zuflüssen gesammelt (Abbildung 1). Die von Juli 2014 bis Juli 2015 zeitlich-integrierenden Proben wurden auf physikalische und chemische Parameter analysiert.

Die Beprobung der Schwebstoffe erfolgte mit Hilfe modifizierter Phillips-Sammler. Die Sammler wurden nach dem Prinzip von Phillips et al. (2000) konstruiert und an kleine Gewässer angepasst (Rohrdurchmesser 5 cm und Länge 50 cm). Die Sedimentation der Schwebstoffe im Sammler wird durch eine Reduktion der Strömungsgeschwindigkeit durch Weitung des Strömungsquerschnitts von 5 mm auf 500 mm erreicht. Nach einer Sammelzeit von +/- 14 Tagen wurden die Sammler an Ort und Stelle in 2 l-Flaschen geleert. Die Abflüsse an den drei Pegeln im Hauptgewässer wurden anhand von Wasserstands-Abfluss-Beziehungen aus 15 min bzw. 5 min Wasserstands-Mittelwerten berechnet. Die synoptische Wetterstation „Trier-Petrisberg“ des Deutschen Wetterdienstes befindet sich im Norden des Einzugsgebietes.

Die frische Schwebstoffprobe wurde kühl und dunkel gelagert und innerhalb von 24 h weiterverarbeitet. Das Material wurde in der Zentrifuge von der Wasserphase getrennt und gefriergetrocknet (DIN 38414-22). Die gefriergetrocknete Probe wurde <2 mm gesiebt und kühl, trocken und dunkel gelagert. Die KGA erfolgte aus der frischen Probe nach ISO 13320:2009 mit dem Mastersizer 3000 (Malvern) in einem Bereich von 0,01-2000 μm . Aus der gefriergetrockneten Probe wurden der partikuläre organische Kohlenstoffgehalt (TOC, DIN EN 13137:2001), der Gesamtstickstoffgehalt (interne SOP, Standard IAEA-C4 Wood & IAEA-C3 Cellulose), der partikuläre Gesamtphosphor (GP, EN ISO 6878:2004), die Gehalte an Cu, Fe, Mn, Pb, Zn (EN ISO 38406-6:1998 und EN ISO 15586:2003) nach Mikrowellenaufschluss mit HNO_3 und H_2O_2 , sowie die Gehalte an polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (Summe der 16 prioritären PAK der Environmental Protection Agency, ΣPAK) via Soxhlet-Extraktion (DIN 38414-20:1996), Clean-up (DIN 38407:3) und Analyse mittels GC-MS (DIN 38407-39:2011) untersucht. Die Beschreibung der verwendeten Methoden findet sich in Keßler et al. (2019).

4. Ergebnisse

Die Abflussganglinien des Olewiger Baches zeigen einen ausgeprägten Jahresgang. Der mittlere Abfluss im Winterhalbjahr 2014/15 betrug am Pegel Kloster ca. 450 l s^{-1} , im Sommer ca. 110 l s^{-1} . Der Zeitraum weist damit den für das Gebiet typischen Jahresgang auf, hebt sich aber durch überdurchschnittlich hohe Abflüsse mit vielen Hochwasserereignissen ab. Fast alle Schwebstoffproben des Winterhalbjahres wurden bei Abflüssen $> 850 \text{ l s}^{-1}$ genommen.

Der Standortvergleich der chemisch-physikalischen Parameter zeigt, dass sich die beiden Zuflüsse in vielen Parametern (TOC, CN, GP, KGA<63 μm , Cu, Fe, Mn, Pb, Zn, ΣPAK) signifikant vom Hauptgewässer unterscheiden. Für die Standorte 1, 3 und 5 im Olewiger Bach hingegen lassen sich keine signifikanten Unterschiede nachweisen (ANOVA, $p < 0,05$, nicht dargestellt). Die Betrachtung des zeitlichen Verlaufs der KGA zeigt, dass die Standorte im Hauptgewässer einen deutlichen Jahresgang in Zusammenhang mit dem Abfluss aufweisen. Von Mitte Oktober 2014 bis Mitte Mai 2015 zeigt sich an den drei Standorten im Hauptgewässer eine Verschiebung der KGA hin zu größeren Korngrößen. In den beiden Zuflüssen ist dies deutlich weniger ausgeprägt, wobei einzelne Proben herausragen (Abbildung 2).

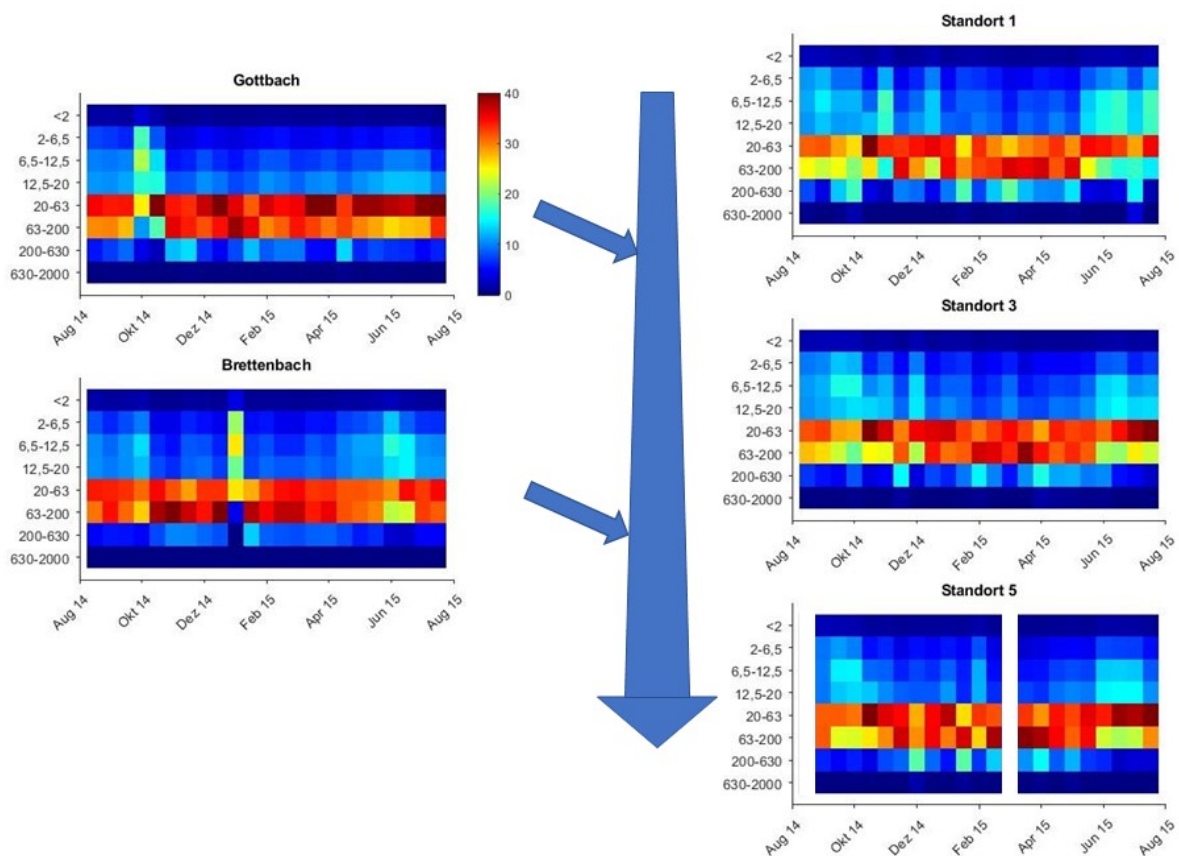


Abb. 2: Standortvergleich der Korngrößenanteile (%) der Schwebstoffe (Pfeile erläutern Fließrichtung). Eine Verschiebung der Färbung nach blau bedeutet eine Abnahme des prozentualen Korngrößenanteils, eine Verschiebung nach rot eine Zunahme.

Mit Blick auf die chemischen Parameter spiegelt sich das beschriebene Muster weder in den Proben des Hauptgewässers noch in denen der Zuflüsse wider. Vielmehr hebt sich im Hauptgewässer die Periode ab Mitte März 2015 durch vergleichsweise hohe Gehalte an TOC, GP, Schwermetallen und PAKs an allen drei Standorten hervor. Diese Ausprägung nimmt jedoch im Verlauf des Gewässers von Standort 1 über 3 nach 5 ab. Die Muster der chemischen Parameter in den beiden Zuflüssen sind heterogener und weisen für die einzelnen Parameter Unterschiede im jährlichen Verlauf auf. Lediglich ab Mai 2015 steigen zeitgleiche einige Stoffgehalte im Brettenbach. Insbesondere die Zinkgehalte steigen von 130 mg kg^{-1} auf über 200 mg kg^{-1} , einhergehend mit stetig abnehmenden Abflüssen. Dabei liegen die Konzentrationen grundsätzlich in einem unkritischen Bereich der einschlägigen Verordnungen.

5. Diskussion & Fazit

Das Monitoring der Schwebstoffe hat gezeigt, dass die Tributäre mit verschiedenartigem Niederschlagswassermanagement sehr unterschiedlich stark belastet sind, sich dies jedoch wider Erwarten nicht unmittelbar auf die Schwebstoffcharakteristik des Hauptgewässers auswirkt.

Das Muster der KGA im Hauptgewässer spiegelt erwartungsgemäß den Abflussgang wider, mit höheren Anteilen großer Korngrößen im Winter. Der Verlauf der KGA in den Teileinzugsgebieten kann auf den Einfluss der Niederschlagswasserbewirtschaftung zurückgehen. Die größere Bandbreite der Korngrößen innerhalb der Einzelproben ist vermutlich auf einzelne große Abflussereignisse zurückzuführen, wie sie auch in Meyer et al. (2013) beschrieben wurden. Diesbezüglich lässt die zeitlich-integrierende Schwebstoffsammlung jedoch keine konkrete Aussage zu. Die gesammelten mittleren Schwebstoffmengen nehmen im Hauptgewässer von Standort 1 (46,2 g) über 3 (49,6 g) nach 5 (78,6 g) zu. Erstaunlicherweise wurden die geringsten Mengen im Gottbach (14,6 g) und beträchtliche Mengen im Brettenbach (105,6 g) entnommen, obwohl der Brettenbach aufgrund des naturnahen Niederschlagsmanagements im Stadtteil die deutlich niedrigeren Abflüsse im Hochwasserereignis aufweist. Ursächlich für die hohen Schwebstoffmengen könnte eine vorherige Umgestaltung des Bachbetts sein, aber auch, dass der Philipps-Sammler die Schwebstoffzusammensetzung adäquat beprobt, jedoch nicht proportional zur Schwebstofffracht (Philipps et al. 2000, Keßler et al. 2019).

Im Hinblick auf die chemischen Parameter zeigt sich trotz stetig zunehmenden Siedlungsanteils von Standort 1 über 3 nach 5 keine signifikante Zunahme der Belastung im Hauptgewässer. Wohl aber sind die Schwebstoffe des durch Mischkanalisationsüberläufe beeinflussten Gottbachs stärker belastet als jene des Brettenbachs, der die Abflüsse aus modifizierten Trennsystemen führt. Im Gegensatz zum Jahrgang der KGA zeigen die chemischen Parameter keinen gleichsinnigen Verlauf mit dem Abfluss. Auffällig ist insbesondere der frühzeitige Anstieg der Gehalte bereits ab März 2015. Zusammenhänge zwischen Zn, Cu und Σ PAKs in dieser Phase legen gleiche Herkunftsgebiete wie Siedlungs- oder Verkehrsflächen nahe (Göbel et al. 2007).

Literatur

- Göbel, R., Dierkes, C., Coldewey, W.G., 2007). Storm water runoff concentration matrix for urban areas. *Journal of Contaminant Hydrology*, 91, 26-42.
- Keßler, S., Bierl, R., Meyer, B., Krein, A., 2017. Chemical effects of a near-to-nature detention pond on a small urban headwater. *Limnologica*, 62, 118-125.
- Keßler, S., Pohlert, T., Breitung, V., Wilcsek, K., Bierl, R., 2019. Comparative evaluation of four suspended particulate matter (SPM) sampling devices and their use for monitoring SPM quality. *Environmental Science and Pollution Research*, doi:10.1007/s11356-019-07314-0.
- Meyer, B., Bierl, R., Keßler, S., Krein, A., 2013. Untersuchung von Niederschlagswassermanagementsystemen und deren stofflicher Wirkung auf den Vorfluter mittels hochaufgelöster Ereignisbeprobung. *Hydrologie und Wasserwirtschaft*, 57, 4, 164-173.
- Phillips, J.M., Russell, M.A., Walling, D.E., 2000. Time-integrated sampling of fluvial suspended sediment: a simple methodology for small catchments. *Hydrological Processes*, 14, 2589-2602.

Niedrigwasser in Thüringen – Zeitreihenanalyse von Abflüssen an Fließgewässerpegeln

Nico Trauth, Ralf Haupt

Zusammenfassung

Im Sommer des Jahres 2018 trat in Mitteleuropa eine intensive Hitzewelle auf (Kornhuber et al. 2019). Die Folgen waren äußerst niedrige Wasserstände in Fließgewässern, Seen und dem Grundwasser. Diese Studie umfasst die Auswertung von Zeitreihen der Thüringer Fließgewässerpegel hinsichtlich des Auftretens von Niedrigwasserereignissen. Hierzu wurden Tagesmittelwerte des Abflusses von 122 Pegeln für den Zeitraum 1925 bis 2018 ausgewertet. Es zeigt sich, dass in Thüringen in nahezu jedem Jahrzehnt extreme Niedrigwasserjahre auftraten (1947/48, 1959, 1976, 1991, 2003, 2018). Das WHJ 2018 war hierbei ein sehr lang anhaltendes, sehr gleichmäßiges, sämtliche Pegel (bzw. Regionen) betreffendes Niedrigwasserjahr. Das bisher stärkste Niedrigwasserjahr von 1976 wird allerdings vom WHJ 2018 bezüglich der Niedrigwasserkenngößen nicht überschritten. Die durchgeführte Datenanalyse stellt Bewertungswerkzeuge für die Einordnung und Wertung zukünftiger Niedrigwasserereignisse bereit.

1. Datengrundlage und -aufbereitung

In der Studie wurden die über einen Tag gemittelten Abflusswerte von insgesamt 122 Pegeln aus dem Bundesland Thüringen verwendet. Diese liegen in den drei europäischen Hauptstromgebieten der Elbe, Weser und Rhein (Abb. 1). In einem ersten Arbeitsschritt wurden neue Daten bis einschließlich des Wasserhaushaltsjahres (WHJ) 2018 angeschlossen und Datenlücken bereinigt. Die Analyse bezieht sich auf vollständige Wasserhaushaltsjahre, also auf einen Zeitraum vom 01.04. bis zum 31.03. des Folgejahres.

Die Auswertung der Daten erfolgte durch *Python* Version 3.0 mit der grafischen Benutzeroberfläche *Spyder* Version 3.0. Für die Zeitreihenanalyse wurde die *Python*-Bibliothek *Pandas* verwendet, welche zahlreiche statistische Auswerteralgorithmen zur Verfügung stellt.

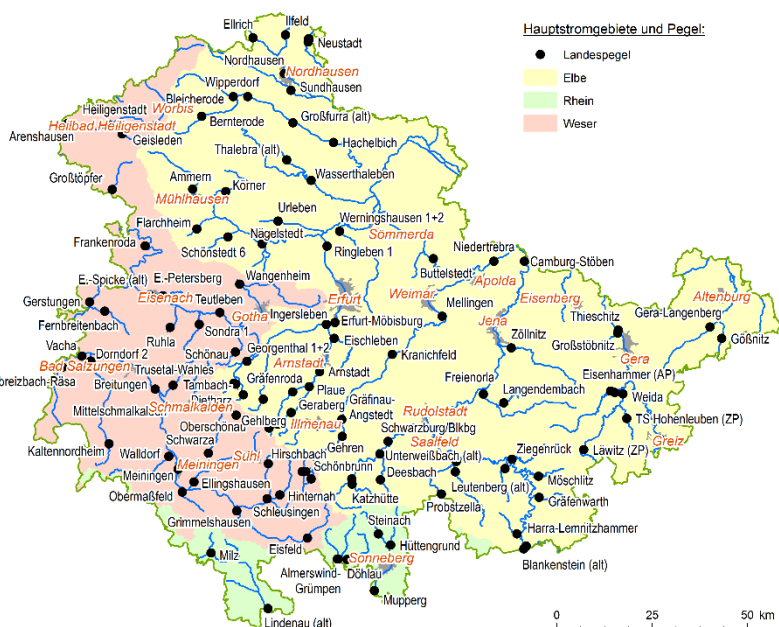


Abb. 9: Übersichtskarte der verwendeten Pegel und der Hauptstromgebiete

2. Methodik

Für die Niedrigwasseranalyse von Gewässerpegeln können zahlreiche Kenngrößen verwendet werden (DVWK, 1983). Es wurden u.a. die mittleren Abflüsse bezogen auf die gesamte Zeitreihe (MQ), einzelne WHJ und einzelne Monate berechnet. Diese Kenngrößen wurden verwendet, um die Abweichung des Mittelwertes eines kurzen Zeitabschnittes (z.B. MQ von einem einzelnen WHJ) von dem jeweiligen langjährigen Mittelwert (MQ) zu beschreiben. Im Falle einer Unterschreitung von z.B. MQ durch das MQ eines einzelnen WHJ ergibt sich somit ein negativer Wert (Abb. 2-oben). Des Weiteren wurden die Mittelwerte aus den jeweils niedrigsten Abflüssen (NQ) eines Jahres berechnet (MNQ), sowie die niedrigsten Abflüsse, die jemals am jeweiligen Pegel gemessen wurden (NNQ).

Hinsichtlich der Dauer und Intensität einer Niedrigwasserperiode liefern die sog. NMxQ-Werte eine wichtige Aussage in der Niedrigwasseranalyse (DVWK, 1992). NMxQ berechnet sich aus dem Mittelwert von den niedrigsten Werten eines Jahres aus dem gleitenden Mittel mit x Tagen. In dieser Studie wurde die Anzahl von Tagen pro WHJ mit einer Unterschreitung der langjährigen NM7Q und NM30Q analysiert (Abb. 2-unten).

Den einzelnen Unterschreitungsperioden wurden Wiederkehrintervalle zugeordnet, die auf der von IAWG (2017) durchgeführten statistischen Analyse der Jährlichkeiten von Niedrigwasser basieren.

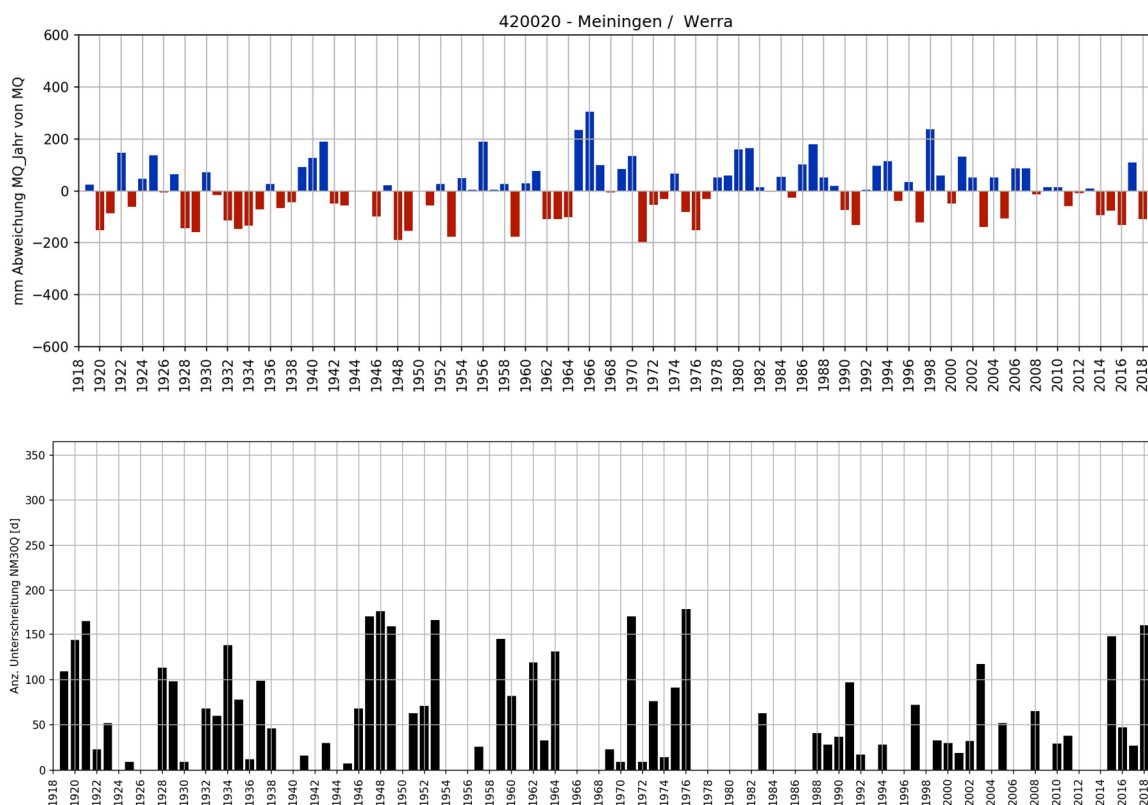


Abb. 2: Oben: Abweichungen des jährlichen Mittelwertes von MQ in mm am Pegel Meiningen/Werra (oben). Unten: Jährliche Gesamtanzahl von Tagen, an denen NM30Q unterschritten wurde.

Zur Charakterisierung von möglichen Änderungen der Niedrigwasserereignisse über die letzten Jahre wurden Trendanalysen mit Mann-Kendall-Tendenztests (Yue et al. 2002) durchgeführt. Des Weiteren wurde die Veränderung des Pardé-Koeffizienten untersucht, der das Verhältnis zwischen dem mittleren Abfluss eines bestimmten Monats und dem Mittelwert des gesamten WHJ bzw. eines längeren Zeitabschnitts beschreibt. Hierdurch lassen sich Änderungen im Abfluss über den saisonalen Verlauf eines Jahres erkennen.

3. Ergebnisse der Niedrigwasseranalyse

Es zeigt sich, dass in Thüringen in nahezu jedem Jahrzehnt extreme Niedrigwasserjahre auftraten. Nennenswert sind hier die WHJ 1947/48, 1959, 1976, 1991, 2003 und 2018. In Abb. 3-oben werden die Niedrigwasserperioden der vergangenen Jahrzehnte deutlich, insbesondere die aktuelle Niedrigwasserperiode ab dem WHJ 2015. Des Weiteren ist bemerkenswert, dass die Anzahl der Unterschreitungstage im Mittel über alle Pegel für das WHJ 2018 am höchsten war (Abb. 3-unten).

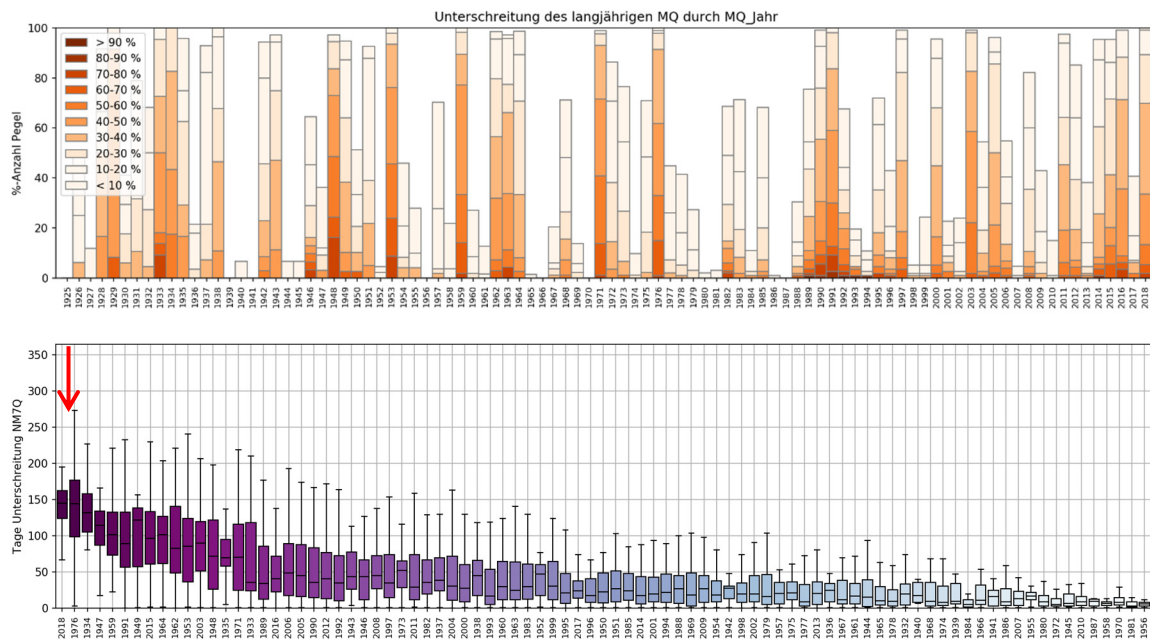


Abb. 3: Oben: Anteil der Pegel, an denen der langjährige mittlere Abfluss MQ durch den mittleren Jahresabfluss unterschritten wird, chronologisch. Die farbliche Differenzierung zeigt die prozentuale Abweichung an. Unten: Anzahl der Unterschreitungstage von NM7Q innerhalb eines WHJ für alle Pegel, sortiert nach dem Mittelwert.

Insgesamt gesehen lässt sich das WHJ 2018 als ein sehr lang anhaltendes, sehr gleichmäßiges und sämtliche Pegel (bzw. Regionen) betreffendes Niedrigwasserjahr beschreiben (prozentuale mittlere Abweichung von MQ: 36,5 % bzw. 145 mm, Dauer der Unterschreitung NMxQ: D(NM7Q): 142 Tage, D(NM30Q): 169 Tage). Das bisher stärkste Niedrigwasserjahr von 1976 wird allerdings vom WHJ 2018 bezüglich aller Niedrigwasserkenngroßen nicht überschritten. Jedoch hatte das WHJ 2018 im Mittel aller Pegel für NM30Q das seltenste Wiederkehrintervall (15,4 Jahre) seit 1959 und für NM7Q das seltenste Wiederkehrintervall (10,5 Jahre) überhaupt.

Eine räumliche Analyse der Stärke der Niedrigwasserereignisse ergibt, dass EZG in niedrigeren Lagen (z.B. Thüringer Becken) mit weniger Waldanteil, geringem mittleren Gefälle und weniger Niederschlag stärker von Niedrigwasserereignissen betroffen sind. Umgekehrt reagieren höher gelegene EZG, wie z.B. der Thüringer Wald, weniger stark auf Niedrigwasserereignisse.

Mann-Kendall Tendenztests für mittlere Abflüsse von jährlichen Zeitabschnitten ergeben, dass für 25,4 % der Pegel die Abflüsse signifikant sinken. Nur bei 3,3 % steigt der Abfluss signifikant an. Für die niedrigsten Abflüsse in den Sommermonaten (April – September) ist für 70,5 % Pegel eine signifikante Abnahme der Abflüsse zu verzeichnen. Demgegenüber ist eine signifikante Zunahme der Dauer von Niedrigwasserperioden (Unterschreitung von NM30Q) nur an 6,6 % der Pegel zu erkennen. Bei 4,9 % der Pegel sinkt sogar die Dauer der Niedrigwasserperioden signifikant.

Die Änderung des Pardé-Koeffizienten zeigt seit 30 Jahren Verschiebungen v.a. im Monat April hin zu trockeneren Perioden an (Abb.4), was auf immer früher einsetzende Wasserdefizite im Jahresverlauf hindeutet, die auf die fehlenden Schneemengen zurückzuführen sein könnten.

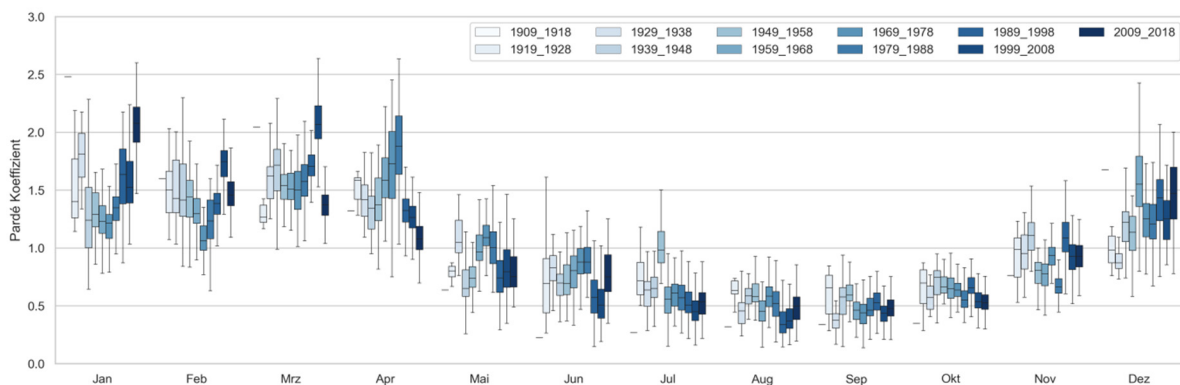


Abb. 4: Jahresverlauf des Pardé-Koeffizienten für 10-jährige Zeitabschnitte.

Literatur

Kornhuber, K., Osprey, S., Coumou, D., Petri, S., Petoukhov, V., Rahmstorf, S., Gray, L., 2019. Extreme weather events in early summer 2018 connected by a recurrent hemispheric wave-7 pattern. *Environmental Research Letters* 14, 2019.

Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK), 1983. Regel 120 -Niedrigwasseranalyse, Teil 1 - Statistische Analyse des Niedrigwasserabflusses., Hamburg und Berlin.

Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK), 1992. Regel 121 - Niedrigwasseranalyse, Teil II - Statistische Untersuchung der Unterschreitungsdauer und des Abflußdefizits., Hamburg und Berlin.

Ingenieurhydrologie, Angewandte Wasserwirtschaft und Geoinformatik (IAWG), 2017: Regionalisierung Thüringen, Stufe 1., IAWG im Auftrag der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie, Ottobrunn.

Yue, S., Pilon, P., Cavadias, G., 2002: Power of the Mann–Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *Journal of Hydrology*, 259(1).

Anthropogenic impacts on water quality of the Pallikaranai catchment, Chennai, India

Daniel Rosado, Lukas Loose, Indumathi M. Nambi, Xiuming Sun, Nicola Fohrer

Abstract

Water bodies of Chennai, India are facing deterioration of water quality due to the heavy anthropogenic impact. It is a great necessity to protect and restore them for the sake of the environment and to guarantee a reliable drinking water supply for the more than 10 million people living in the city. The present study assessed water quality in six lakes and a marshland within the Pallikaranai catchment in the city of Chennai (southeast of India). During the three sampling campaigns carried out between June and September 2019 impacts were easily visible, including the frequent intense green colour of the Chitlapakkam lake water and a massive death of fishes in the Sembakkam lake. In addition, the laboratory analysis proved high concentrations of pollutants, a high degree of eutrophication, quick change of water quality and great differences from lake to lake. pH in the lakes of the catchment reached 9.2 and chlorophyll a was frequently over 50 µg/l.

1. Introduction

Industrialization and economic growth in developing countries have put a lot of pressure on aquatic ecosystems (Dhamodharan et al., 2019; Rosado et al., 2015). The Pallikaranai catchment, located in Chennai, India, contains seven lakes and a marshland, including the Sembakkam lake, a proposed Ramsar site. In spite of the latter, the effects of anthropogenic activities are visible along the catchment in different ways, such as the reduction of birds and other animals, and the increase of the turbidity of waters. Sources of pollution include an uncontrolled dumpsite and a sewage treatment plant situated in the marshland.

This reduction in water quality is endangering the ecosystems and threatening the surrounding communities, which use the lakes for fishery and the groundwater for drinking. With all of this in mind, this study aims at evaluating the water quality in the lake and identify potential pollution sources as a key information for a future restoration.

2. Methods

Three monthly sampling campaigns were carried out between July and September 2019 in both i) the lakes of the Pallikaranai catchment, with the exception of Keelkatalai Lake that was dry, and ii) Okkiyam maduvu, the outlet of the Pallikaranai catchment, located in a marshland (Figure 1).

Samples were placed in a portable refrigerator (4°C) in the dark and transported to the laboratory of the Civil Engineering Department of the Indian Institute of Technology Madras and the following parameters were measured accordingly to the methods defined by APHA (2012): chemical oxygen demand (COD), chlorophyll A (Chl-A), sulfate and chloride.

At the same points and dates, in-situ measurements of pH, dissolved oxygen (DO), electrical conductivity (EC) and temperature were made with a Portable Multi-Parameter Meter HQ40d (Hach). The portable device was calibrated in situ with the standards provided by the manufacturer.

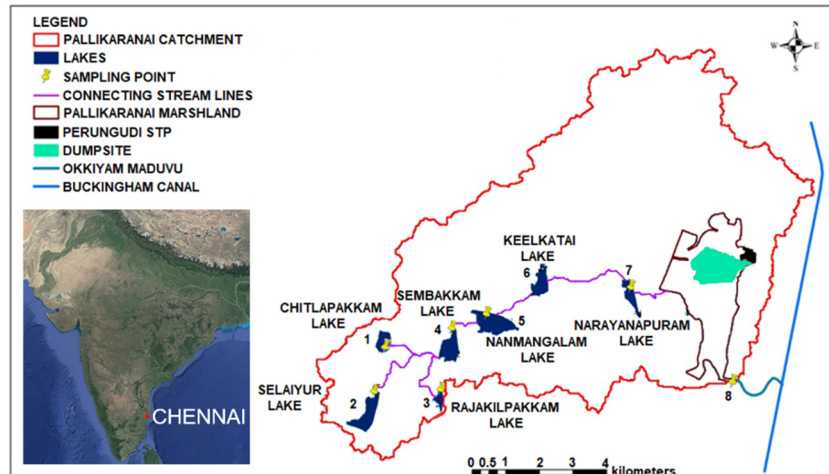


Figure 1. Sampling points in the seven lakes and the marshland of the Pallikaranai catchment (Chennai, India).

3. Results and discussion

During the sampling campaigns some problems were visible, as the intense green color of the Chitlapakkam lake water and a massive death of fishes in the Sembakkam lake (Figure 2). Also, it was observed that, as a result of the water scarcity, there was no water flow between the lakes until the end of the research period and therefore, they were not interconnected.



Figure 2. Pictures of the Chitlapakkam lake (left) and Sembakkam lake (right) part of the Pallikaranai catchment (Chennai, India).

As can be seen in Figure 3, the water quality parameters generally showed a bad condition and varied highly among months and lakes. pH and DO were out of the range of suitability for aquatic life defined by the USEPA in many samples (United States Environmental Protection Agency, 2019).

COD levels were especially high during August and September and reached values over two-thirds of the average of wastewater in developing countries reported by Henze et al. (2015). Levels of Chl-A suggested severe eutrophication, usually in the range of eutrophication and

hypereutrophication (Carlson and Simpson, 1996). R^2 between DO and Chl-A equaled 0.42, suggesting a certain degree of correlation. It was observed that sewage from nearby households was discharged directly into the lakes and together with urban runoff seems to be one of the main pollution sources explaining the levels of COD and Chl-A.

Sulfate values were usually well below 250 mg/L, the threshold defined by the EU for drinking water (European Council, 1998). On the other hand, chloride was over 230 mg/L in the lakes, and even above 860 mg/L in the marshland, the chronic and acute thresholds for preservation of freshwater aquatic life defined by the USEPA respectively (United States Environmental Protection Agency, 2019). An intrusion of seawater due to the low groundwater levels in the marshland might be a potential reason.

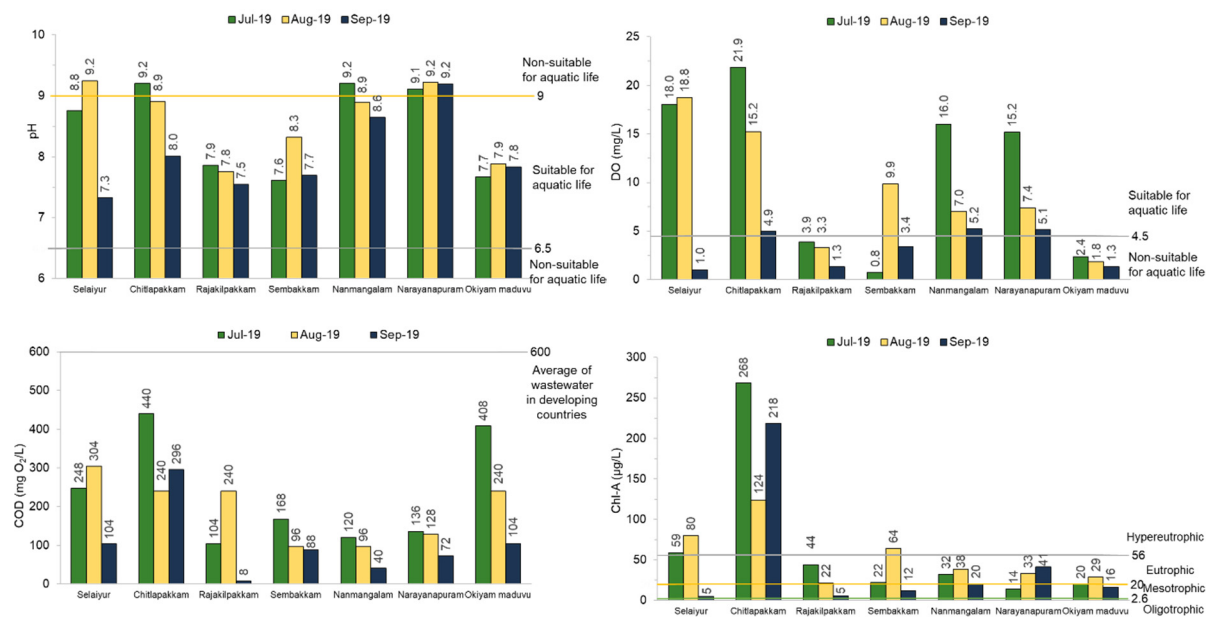


Figure 3. Results of pH, dissolved oxygen (DO), chemical oxygen demand (COD) and chlorophyll a (Chl-A) in the six lakes and the marshland (Okkiyam Maduvu) of the Pallikaranai catchment (Chennai, India). Threshold values sources: pH and DO (United States Environmental Protection Agency, 2019), COD (Henze et al., 2015) and Chl-A (Carlson and Simpson, 1996).

These results might be partially explained due to the severe drought that took place in Chennai at the beginning of the sampling, followed by an increase in rainfall events. However, droughts are common in Chennai during this season and, thus, these values are likely to be reached every year.

4. Conclusions

The water quality in the lakes and the marshland of the Pallikaranai catchment is not always suitable for aquatic life and it is also deteriorated by high eutrophication.

Sewage and urban runoff coming from nearby households was identified as a relevant source of pollution considering the chemical oxygen demand and chlorophyll a levels.

Intrusion of seawater due to the low groundwater levels in the marshland is likely to be happening.

Further research is needed to more precisely estimate the impact of the mentioned pollution sources and to identify other relevant pollution sources that allow a successful proposal for restoration.

5. Acknowledgements

This study has been funded by The Nature Conservancy, the Deutsche Hydrologische Gesellschaft (DHG), the Deutsche Akademische Auslandsdienst (DAAD) through the Indo German Centre for Sustainability (IGCS). We thank the laboratory team of the Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology Madras (IITM) for their support.

Literature

- APHA, 2012. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22nd ed. Washington DC.
- Carlson, R.E., Simpson, J., 1996. A Coordinator's Guide to Volunteer Lake Monitoring Methods. North Am. Lake Manag. Soc.
- Dhamodharan, A., Abinandan, S., Aravind, U., Ganapathy, G.P., Shanthakumar, S., 2019. Distribution of Metal Contamination and Risk Indices Assessment of Surface Sediments from Cooum River, Chennai, India. *Int. J. Environ. Res.* 13, 853–860. <https://doi.org/10.1007/s41742-019-00222-8>
- European Council, 1998. Directive 98/83/EC of 3 November 1998 on the quality of water intended for human consumption [WWW Document]. URL <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:1998:330:0032:0054:EN:PDF> (accessed 4.9.17).
- Henze, M., van Loosdrecht, M.C.M., Ekama, G.A., Brdjanovic, D., 2015. Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design. *Water Intell.* Online. <https://doi.org/10.2166/9781780401867>
- Rosado, D., Usero, J., Morillo, J., 2015. Application of a new integrated sediment quality assessment method to Huelva estuary and its littoral of influence (Southwestern Spain). *Mar. Pollut. Bull.* 98, 106–14. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.07.008>
- United States Environmental Protection Agency, 2019. National Recommended Water Quality Criteria - Aquatic Life Criteria Table [WWW Document]. URL <https://www.epa.gov/wqc/national-recommended-water-quality-criteria-aquatic-life-criteria-table> (accessed 12.16.19).

Weichenstellung im Untergrund – vom Baseflow-Index zum Grundwasser-Neubildungs-Index?

Andreas Steinbrich, Hannes Leistert, Michael Stölzle, Markus Weiler

Zusammenfassung

Ein neuer räumlich verteilter, prozessbasierter Ansatz zur Quantifizierung der Grundwasserneubildung wird vorgestellt. Der Anteil der Grundwasserneubildung am Gesamtabfluss (Oberflächenabfluss + Zwischenabfluss + Grundwasserabfluss) wird als Grundwasser-Neubildungs-Index (GwN-I) definiert. Er unterscheidet sich von dem, aus Abflussganglinien abgeleiteten, Base Flow Index (BFI) hinsichtlich der Methodik der Berechnung und der klar quantifizierten Komponenten. Der GwN-I quantifiziert Sickerwasser, das dem Grundwasser zufließt. Der BFI quantifiziert Abfluss aus langsam leerlaufenden Speichern, was je nach Reaktionszeit der Abflusskomponenten zu größeren Unterschieden zwischen BFI und GwN-I führen kann.

1. Einleitung

Im Boden und am Übergang zum geologischen Untergrund entscheidet sich, ob Perkulationswasser nach unten dem Grundwasser zustrebt oder lateral als Zwischenabfluss abfließt. Wesentliche Faktoren sind hierbei das Gefälle, die Durchlässigkeit und Schichtung von Boden und Untergrund, sowie die laterale Durchlässigkeit im Boden aufgrund präferenzierter Fließwege (DWA 2020). Diese Weichenstellung im Untergrund ist von hoher Relevanz für die Grundwasserneubildung und daher Gegenstand vieler Untersuchungen und Modellansätze. Für Gebiete mit gemessenen Abflusswerten wird der Anteil des Grundwassers am Gesamtabfluss durch verschiedene Verfahren zur Abtrennung der langsamen Abflusskomponenten (Basisabfluss) vom Gesamtabfluss abgeschätzt, z.B. nach Demuth (1993), WMO (2009) mit dem Base Flow Index (BFI) oder nach Stölzle et al. 2020 mit dem Delayed Flow Index (DFI). Der BFI wird häufig in Grundwasserneubildungsmodellen zur Aufteilung des Sickerwassers in laterale Komponenten und Grundwasserneubildung herangezogen, da diese häufig den Zwischenabfluss nicht abbilden können. Dazu erfolgt üblicherweise eine Übertragung des BFI mittels verschiedener Regionalisierungsansätze (z.B. Armbruster 2002). Das prozessbasierte Niederschlag-Abfluss-Wasserhaushalts-Modell RoGeR_WB bildet die Abflussbildung an der Oberfläche und die Aufteilung des Sickerwassers im Untergrund räumlich und zeitlich hoch aufgelöst und prozessbasiert ab. Dazu werden eine Vielzahl von flächenhaft verfügbaren Daten genutzt. So ist es möglich den Quotienten aus Tiefenperkolation bzw. Grundwasserneubildung zum Gesamtabfluss flächendetailliert zu berechnen. Da die Ermittlung dieses Quotienten auf einer gänzlich anderen Grundlage beruht als die des BFI oder DFI, wird dafür der Begriff Grundwasser-Neubildungs-Index (GwN-I) vorgeschlagen.

2. Methoden

Das Wasserhaushaltsmodell RoGeR_WB ist eine Weiterentwicklung des ereignisbasierten N-A-Modells RoGeR (Steinbrich et al. 2016). Es bildet neben den Prozessen der Abflussbildung auch aktuelle Verdunstung, Schneeschmelze und kapillaren Aufstieg ab. Je nach Intensität des Niederschlags wird automatisch ein Modellschritt von 10 Minuten, 1 Stunde oder einem Tag (kein Niederschlag) angewendet. Damit wird der Bedeutung hoher Intensitäten bei der

Entstehung von Horton'schem Oberflächenabfluss oder schnellem Zwischenabfluss Rechnung getragen. Das Modell wurde detailliert mit anderen Wasserbilanzmodellen, Lysimeterdaten und langjährigen Bodenfeuchtemessungen verglichen. Es wurde als 1-D-Version (nur lokale Prozesse) für den Zeitraum 2006 - 2017 auf den gesamten Raum von Baden-Württemberg angewendet. Dabei wird der Raum in rund 4.380.000 Teil-Flächen gegliedert. Die Ausprägung aller Komponenten des Wasserhaushaltes kann so flächendetailliert berechnet werden. Aus dem Verhältnis der lokalen Grundwasserneubildung (Tiefenperkolation) zum Gesamtabfluss (Oberflächenabfluss + Zwischenabfluss + Tiefenperkolation) kann so unter anderem auch der GwN-I berechnet werden.

Für 92 ausgewählte Pegel-Einzugsgebiete (Abb. 1 rechts) wurde dieser auf Einzugsgebietsebene ermittelt und BFI-Werten gegenübergestellt, die anhand verschiedener Ansätze aus gemessenen Abflussganglinien ermittelt wurden. Dazu wurden Ansätze nach Demuth (1993), WMO (2009) und Stoelzle et al. (2020) herangezogen. Allen diesen Ansätzen ist gemein, dass sie auf Tagesmittelwerte des Abflusses zurückgreifen. Die Abflüsse werden von den beiden erstgenannten Ansätzen in zwei Komponenten (schnelle und langsame) aufgeteilt. Die langsame Komponente wird häufig dem grundwasserbürtigen Abfluss zugeschrieben. Beim Ansatz von Stoelzle et al. (2020) werden aufgrund der Reaktionszeit des Abflusses drei, vier oder mehr Komponenten unterschieden (z.B. schnell, intermediär 1 und 2 und langsam). Die Anteile der jeweiligen Komponenten K am Gesamtabfluss werden hier als „Delayed Flow Index“ (DFI_K) bezeichnet.

3. Ergebnisse

In Abb. 1 ist die räumliche Verteilung der GwN-I den von Armbruster (2002) regionalisierten BFI nach Demuth (1993) gegenübergestellt. Dabei ist eine ähnliche räumliche Gliederung erkennbar. Die GwN-I weisen jedoch einen höheren räumlichen Detaillierungsgrad auf. Tendenziell liegen die GwN-I-Werte höher als die BFI-Werte nach Armbruster.

Abb. 2 zeigt den Vergleich der für die Einzugsgebiete ermittelten mittleren GwN-I-Werte gegen BFI- bzw. DFI-Werte aus den oben genannten Ansätzen. Generell ist eine starke Streuung der GwN-I zu den BFI- bzw. DFI-Werten festzustellen. Im Verhältnis zum Verfahren nach Demuth (1993) und den DFI_{langsam} nach Stoelzle et al. (2020) liegen die ermittelten GwN-I alle über der 1:1-Linie. Im Vergleich zu den BFI nach WMO und den $DFI_{\text{intermediär+langsam}}$ streuen die GwN-I um die 1:1-Linie.

4 Diskussion

Die GwN-I sind prozessbasiert abgeleitet. Die Aufteilung des Sickerwassers in Zwischenabfluss und Tiefenperkolation ist jedoch stark beeinflusst von der Parametrisierung der vertikalen Durchlässigkeit des geologischen Untergrundes. Diese ist oft nur schwach gesichert. Mit der Aufteilung ist zunächst keine Aussage über die Reaktionszeit verbunden. Sowohl schneller Zwischenabfluss als auch schneller Grundwasserabfluss können zum Teil schon innerhalb von Stunden bis wenigen Tagen am Pegel ankommen. Die Aufteilung der Abflusskomponenten der Abflussganglinie erfolgt dagegen aufgrund der Reaktionszeit auf Basis von Tageswerten. Damit ist wiederum nicht zwangsläufig ein Entstehungsprozess verbunden. Die verschiedenen Ansätze zum BFI bzw. DFI quantifizieren Speicher, die langsam leerlaufen. Der GwN-I

quantifiziert den Anteil des Sickerwassers, das dem Grundwasser zufließt. Dieses kann auch schnell in das Gewässer gelangen.

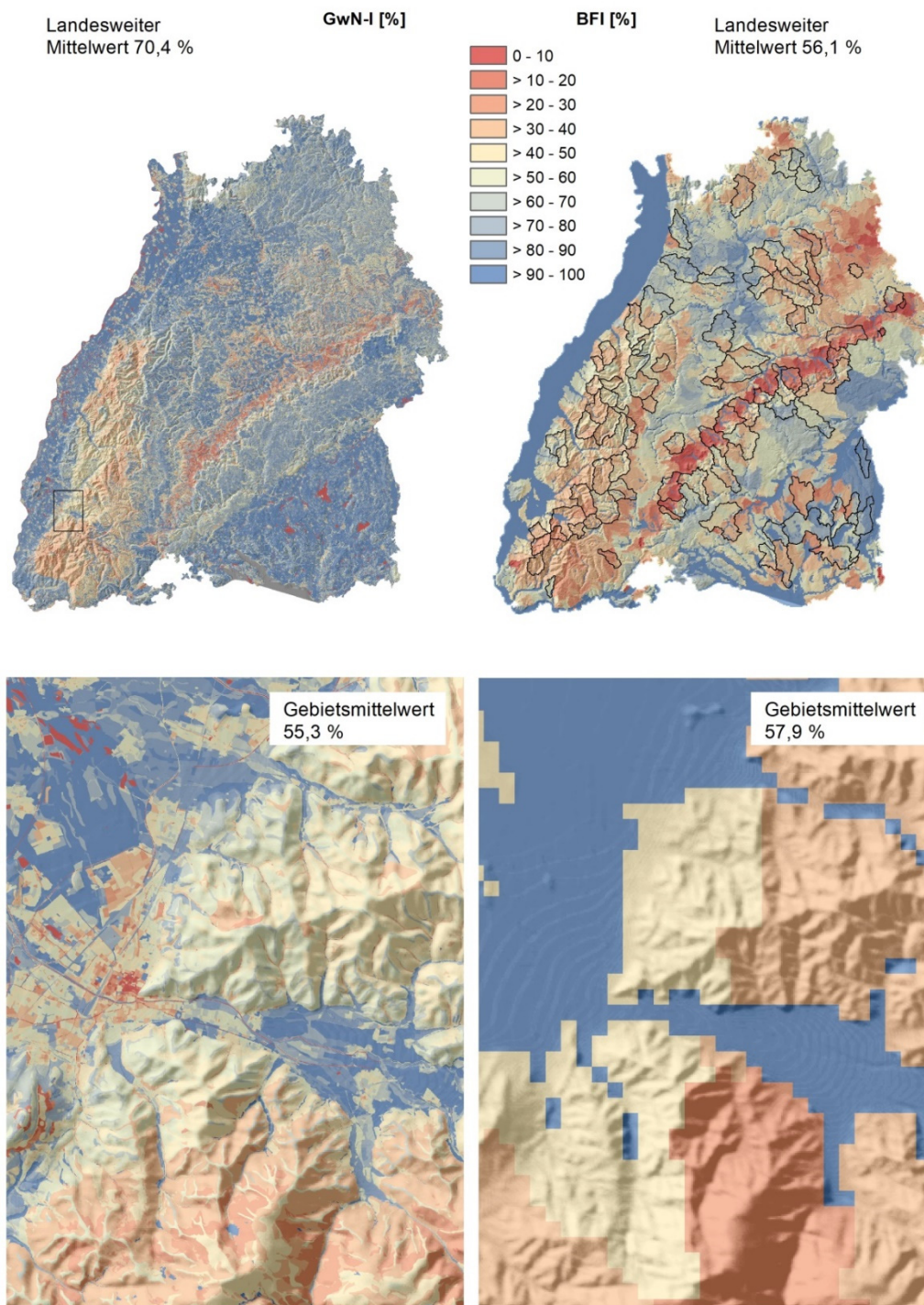


Abb. 1: Links oben landesweite Verteilung von GwN-I und Lage des vergrößerten Ausschnitts. Rechts oben der von Armbruster (1993) regionalisierte BFI mit Lage der, für diese Untersuchung ausgewählten, Pegeleinzugsgebiete. Unten die entsprechende Verteilung im gewählten Ausschnitt.

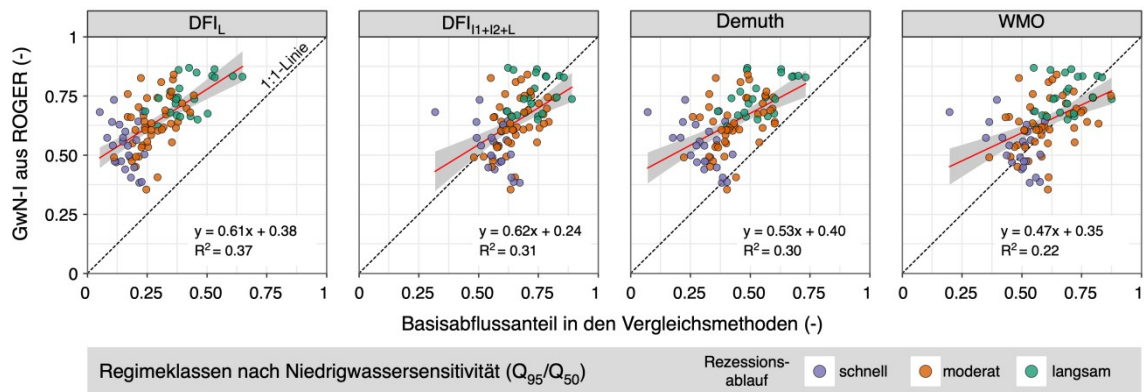


Abb. 2: Vergleich des GwN-I aus RoGeR (Ordinate) gegen verschiedene DFI und BFI (Abszisse) für 92 Einzugsgebiete in Baden-Württemberg. Die Punktsymbole sind entsprechend der Regimeklassen aus Q_{95}/Q_{50} gefärbt.

Danksagung

Die Autoren danken der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, die das „Forschungsprojekt zur Erarbeitung von Grundlagen für die landesweite Abschätzung der Vulnerabilität von Grundwasser gegenüber Stoffeinträgen durch Sickerwasser und eines flächendetaillierten Grundwasserneubildungs-Index (GwN-I)“ finanziert hat, aus dem die vorgestellten Ergebnisse stammen.

Literatur

- Armbruster, V., 2002. Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg Freiburger Schriften zur Hydrologie, 2002; 17, Institute of Hydrology (Hrsg.)
- Demuth, S., 1993. Untersuchungen zum Niedrigwasser in West-Europa. Freiburger Schriften zur Hydrologie, 1993; 1, Institute of Hydrology (Hrsg.)
- DWA, 2020. Merkblatt DWA-M 922 „Bodenhydrologische Kartierung und Modellierung“ (in Druck).
- Steinbrich, A., Leistert, H., Weiler, M., 2016. Model-based quantification of runoff generation processes at high spatial and temporal resolution. *Environmental Earth Sciences*, 75:1423. doi:10.1007/s12665-016-6234-9
- Stoelzle, M., Schütz, T., Weiler, M., Stahl, K. und Tallaksen L. M., 2020. Beyond binary baseflow separation: delayed flow index as a fresh perspective on streamflow contributions. *Hydrology and Earth System Science*, 2019-236 (in Druck).
- WMO, 2009. Manual on Low-flow Estimation and Prediction – Operational Hydrology Report No. 50, edited by A. Gustard and S. Demuth, World Meteorological Organization, 1029, 136.

Schriftenreihe Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung

Bisher erschienene Hefte

- Heft 01.02 Wechselwirkungen zwischen Grundwasserleitern und Oberflächengewässern
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2002 am 20./21. März 2002 in Suderburg
Herausgeber: Hartmut Wittenberg und Matthias Schöniger
210 Seiten, 63 Abbildungen, Format A4
ISBN: 3-936514-22-4 vergriffen
- Heft 02.02 Hochwassermanagement – Gefährdungspotenziale und Risiko der Flächennutzung
Beiträge zum Seminar am 7./8. November 2002 in Koblenz
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg und Günter Meon
201 Seiten, 43 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-936514-26-7 vergriffen
Aktualisierte Neuauflage erschienen als Heft 02.03
Beiträge zum Seminar am 12./13. Juni 2003 in Weimar
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg und Günter Meon
200 Seiten, 65 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-924063-58-3 vergriffen
- Heft 03.03 Numerische Simulationsmodelle für Fließgewässer
Beiträge zum Seminar am 12./13. Mai 2003 in Stein bei Nürnberg
Herausgeber: Siegfried Bloß und Hans-B. Kleeberg
185 Seiten, 32 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-924063-57-5 vergriffen
Aktualisierte Neuauflage erscheinen als Heft 03.05
Beiträge zum Seminar am 15. März 2005 in Dortmund
Herausgeber: Siegfried Bloß und Hans-B. Kleeberg
185 Seiten, 65 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-924063-57-5 vergriffen
- Heft 04.03 Klima – Wasser – Flussgebietsmanagement – im Lichte der Flut
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2003 am 20./21. März 2003 in Freiburg i.Br.
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg
Band1 Vorträge, 270 Seiten, 144 Abbildungen, Format A4
Band 2 Poster, 194 Seiten 105 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-924063-59-1 vergriffen
- Heft 05.04 Wasser- und Stofftransport in heterogenen Einzugsgebieten
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2004 am 22./23. März 2004 in Potsdam
Herausgeber: Axel Bronstert, Annegret Thieken, Bruno Merz,
Michael Rode, Lucas Menzel
Band1 Vorträge, 221 Seiten, 88 Abbildungen, Format A4
Band 2 Poster, 315 Seiten, 144 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-937758-18-6 beide Bände zusammen 45 EUR
- Heft 06.04 Hochwassermanagement – Gefährdungspotenziale und Risiko der Flächennutzung
Neuauflage
Beiträge zum Seminar am 17./18. Juni 2004 in Münster
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg und Günter Meon
172 Seiten, 61 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-937758-19-4 vergriffen

Heft 07.04	<p>Niedrigwassermanagement Beiträge zum Seminar am 11./12. November 2004 in Koblenz Herausgeber: Hans-B. Kleeberg und Gero Koehler 172 Seiten, 82 Abbildungen, Format A4 ISBN 3-937758-47-X</p>	vergriffen
Heft 08.05	<p>Hochwasser-Gefahrenkarten Teil 1: Erarbeitung und Nutzung von Hochwassergefahrenkarten Beiträge zum Erfahrungsaustausch am 24. November 2004 in Erfurt Teil 2: Zonierungssystem und Risikomodellierung in der Versicherungswirtschaft Herausgeber: Hans-B. Kleeberg 140 Seiten, 34 Abbildungen, Format A4 ISBN 3-937758-48-8</p>	vergriffen
Heft 03.05	<p>Numerische Simulationsmodelle für Fließgewässer Beiträge zum Seminar am 15. März 2005 in Dortmund Aktualisierte Neuauflage von Heft 03.03 Herausgeber: Siegfried Bloß und Hans-B. Kleeberg 185 Seiten, 65 Abbildungen, Format A4 ISBN 3-924063-57-5</p>	vergriffen
Heft 09.05	<p>Niederschlag – Input für hydrologische Berechnungen Beiträge zum Seminar am 12./13. April 2005 in Koblenz Herausgeber: Hans-B. Kleeberg 159 Seiten, 44 Abbildungen, Format A4 ISBN 3-937758-67-4</p>	vergriffen
Heft 10.05	<p>Entscheidungsunterstützung in der Wasserwirtschaft – von der Theorie zum Anwendungsfall Beiträge zum Tag der Hydrologie 2005 am 22./23. März 2005 in Aachen Herausgeber: Heribert Nacken, Sabine Bartussek, Hani Sewilam 314 Seiten, 131 Abbildungen, 25 Tabellen, Format A4 ISBN 3-937758-68-2</p>	42 EUR, CD 29 EUR
Heft 11.05	<p>Hochwasser – Vorsorge und Schutzkonzepte Beiträge zum Seminar am 2./3. Juni 2005 in Braunschweig Herausgeber: Hans-B. Kleeberg und Günter Meon 200 Seiten, 75 Abbildungen, Format A4 ISBN 3-937758-80-1</p>	38 EUR, CD 29 EUR
Heft 12.05	<p>Akustische Doppler Geräte (ADCPs) in der Hydrometrie: Möglichkeiten und Perspektiven einer innovativen Technik Beiträge zum Seminar am 28./29. September 2005 in Koblenz Herausgeber: Matthias Adler und Hans-B. Kleeberg 172 Seiten, 120 Abbildungen, 8 Tabellen, Format A4 ISBN 3-937758-90-9</p>	38 EUR, CD 29 EUR
Heft 13.05	<p>Abflussbildung – Prozessbeschreibung und Fallbeispiele Herausgeber: Axel Bronstert Monographie, 2005 148 Seiten, 81 Abbildungen, 12 Tabellen, Format A4 ISBN 3-937758-91-7</p>	38 EUR, CD 29 EUR

- Heft 14.06 Niederschlag – Input für hydrologische Berechnungen
Aktualisierte Neuauflage
Beiträge zum Seminar am 12./13. April 2005 in Koblenz
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg
205 Seiten, Format A4
ISBN-10: 3-939057-30-4
ISBN-13: 978-3-939057-30-7 38 EUR, CD 29 EUR
- Heft 15.06 Risikomanagement extremer hydrologischer Ereignisse
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2006 am 22./23. März 2006
an der Universität der Bundeswehr München
Herausgeber: Markus Disse, Karin Guckenberger, Sabine Pakosch,
Alpaslan Yörük, Astrid Zimmermann
Band 1 Vorträge 1, 278 Seiten
Band 2 Vorträge 2, 338 Seiten beide Vortragsbände zusammen 50 EUR
Band 3 Poster, 280 Seiten Posterband zusätzlich/alleine 15 EUR
ISBN-10: 3 939057-31-2
ISBN-13: 978-3-939057-31-4
- Heft 16.06 Niederschlag-Abfluss-Modellierung
Beiträge zum Workshop am 10./11. April 2006 in Trier
Herausgeber: Markus Casper und Marcus Herbst
195 Seiten, Format A4
ISBN-10: 3-939057-55-X
ISBN-13: 978-3-939057-55-0 45 EUR, CD 29 EUR
- Heft 17.06 Dezentraler Hochwasserschutz
Beiträge zum Seminar am 16./17. Oktober 2006 in Koblenz
Herausgeber: Klaus Röttcher, Gero Koehler, Hans-B. Kleeberg
188 Seiten, Format A4
ISBN-10: 3-939057-56-8
ISBN-13: 978-3-939057-56-7 45 EUR, CD 29 EUR
- Heft 18.06 Hochwasser – Vorsorge und Schutzkonzepte
Beiträge zum Seminar am 6./7. November 2006 in Stein bei Nürnberg
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg, Heribert Nacken
232 Seiten, Format A4
ISBN-10: 3-939057-57-6
ISBN-13: 978-3-939057-57-4 45 EUR, CD 29 EUR
- Heft 19.07 Dezentraler Hochwasserschutz
Beiträge zum Seminar am 4./5. Juni 2007 in Leipzig
Herausgeber: Klaus Röttcher, Gero Koehler, Hans-B. Kleeberg
196 Seiten, Format A4
ISBN-13: 978-3-940173-03-4 48 EUR, CD 29 EUR

Heft 20.07	<p>Einfluss von Bewirtschaftung und Klima auf Wasser- und Stoffhaushalt von Gewässern Beiträge zum Tag der Hydrologie 2007 am 22./23. März 2007 an der Universität Rostock Herausgeber: Konrad Miegel, Ellen-Rose Trübger, Hans-B. Kleeberg Band 1 Vorträge, 276 Seiten Band 2 Poster, 17 Seiten ISBN: 978-3-940173-04-1</p>	<p>beide Bände zusammen 60 EUR, , CD 29 EUR</p>
Heft 21.07	<p>Verdunstung Beiträge zum Seminar am 10./11. Oktober 2007 in Potsdam Herausgeber: Konrad Miegel, Hans-B. Kleeberg 252 Seiten, Format A4 ISBN: 978-3-940173-05-8</p>	<p>48 EUR, CD 29 EUR</p>
Heft 22.07	<p>EU-Hochwasserrichtlinie Wohin geht die Reise beim Europäischen Hochwasserschutz Beiträge zum Seminar am 19./10. November 2007 in Koblenz Herausgeber: Heribert Nacken 126 Seiten, Format A4 ISBN: 978-3-940173-44-7</p>	<p>48 EUR, CD 29 EUR</p>
Heft 23.08	<p>Hochwasser, Wassermangel, Gewässerverschmutzung – Problemlösung mit modernen hydrologischen Methoden Beiträge zum Tag der Hydrologie 2008 am 27./28. März 2008 an der Leibniz Universität Hannover Herausgeber: Uwe Haberlandt, Bernd Riemeier, Max Billib, Hans-Reinhard Verworn, Hans-B. Kleeberg 300 Seiten, Format A4, mit Poster-CD ISBN: 978-3-940173-96-6</p>	<p>48 EUR, CD 29 EUR</p>
Heft 24.08	<p>Klimawandel – Was kann die Wasserwirtschaft tun? Beiträge zum Symposium am 24./25 Juni 2008 in Nürnberg Herausgeber: Hans-B. Kleeberg 256 Seiten, Format A4 ISBN: 978-3-940173-97-3</p>	<p>48 EUR, CD 29 EUR</p>
Heft 25.09	<p>EU-Hochwasserrichtlinie In drei Schritten zur Umsetzung Beiträge zum Seminar am 19. Februar 2009 in Magdeburg Herausgeber: Heribert Nacken 126 Seiten, Format A4 ISBN: 978-3-941089-53-2</p>	<p>48 EUR, CD 29 EUR</p>
Heft 26.09	<p>Hydrologische Systeme im Wandel Beiträge zum Tag der Hydrologie 2009 am 26./27. März 2009 an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel Herausgeber: Nicola Fohrer, Britta Schmalz, Georg Hörmann, Katrin Bieger 196 Seiten, Format A4 ISBN: 978-3-941089-54-9</p>	<p>48 EUR, CD 29 EUR</p>

Heft 27.10	<p>Auen und Hochwasser Beiträge zum Internationalen Symposium am 10./11. Februar 2010 in Ingolstadt Herausgeber: Bernd Cyffka, Hans-B. Kleeberg 226 Seiten, Format A4 ISBN: 978-3-941897-08-3</p>	50 EUR, CD 29 EUR
Heft 28.10	<p>Abflüsse aus extremen Niederschlägen Beiträge zum 2. Trierer Workshop zur Niederschlag-Abfluss-Modellierung am 14./15. September 2009 in Trier Herausgeber: Markus Casper, Oliver Gronz 245 Seiten, Format A4 ISBN: 978-3-941897-22-9</p>	50 EUR, CD 29 EUR
Heft 29.10	<p>Nachhaltige Wasserwirtschaft durch Integration von Hydrologie, Hydraulik, Gewässerschutz und Ökonomie Beiträge zum Tag der Hydrologie 2010 am 25./26. März 2010 an der Technischen Universität Braunschweig Herausgeber: Günter Meon 283Seiten, Format A4, mit Poster-CD ISBN: 978-3-941897-49-6</p>	50 EUR, CD 29 EUR
Heft 30.11	<p>Hydrologie & Wasserwirtschaft - von der Theorie zur Praxis Beiträge zum Tag der Hydrologie 2011 am 24./25. März 2011 an der Technischen Universität Wien Herausgeber: Günter Blöschl, Ralf Merz 394 Seiten, Format A4 ISBN: 978-3-941897-79-3</p>	50 EUR, CD 29 EUR
Heft 31.12	<p>Wasser ohne Grenzen Beiträge zum Tag der Hydrologie 2012 am 22./23. März 2012 an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg Herausgeber: Markus Weiler 413 Seiten, Format A4, mit Poster-CD ISBN: 978-3-942964-38-8</p>	50 EUR, CD 29 EUR
Heft 32.13	<p>Wasserressourcen im globalen Wandel: Hydrologische Grundlagen - von der Messung zur Anwendung Beiträge zum Tag der Hydrologie 2013 am 4.-6. April 2013 an der Universität Bern Herausgeber: Rolf Weingartner, Bruno Schädler 199 Seiten, Format A4 ISBN: 978-3-942964-89-0</p>	50 EUR, CD 29 EUR
Heft 33.13	<p>Simulation hydrologischer Systeme – Wie nah kommen wir der Realität? Beiträge zum 3. Trierer Workshop zur Niederschlag-Abfluss-Modellierung am 17./18. September 2012 in Trier Herausgeber: Markus Casper, Oliver Gronz 212 Seiten, Format A4 ISBN: 978-3-944328-02-7</p>	50 EUR, CD 29 EUR

- Heft 34.14 Wasser - Landschaft - Mensch in Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft
Beiträge zum Tag der Hydrologie am 20./21. März 2014 an der Katholischen Universität Eichstätt-Ingolstadt
Herausgeber: Bernd Cyffka
274 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-944328-61-4 50 EUR, CD 29 EUR
- Heft 35.15 Aktuelle Herausforderungen im Flussgebiets- und Hochwassermanagement
Prozesse | Methoden | Konzepte
Beiträge zum Tag der Hydrologie am 19./20. März 2015 an der Universität Bonn
Herausgeber: Mariele Evers, Bernd Diekkrüger
389 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-88721-229-2
DOI: 10.14617/for.hydrol.wasbew.35.15
- Heft 36.16 Räumliche Heterogenität - Erkennen, Abbilden, Validieren oder Ignorieren?
Beiträge zum 4. Trierer Workshop zur Niederschlag-Abfluss-Modellierung am 5. und 6. Oktober 2015 in Trier
Herausgeber: Markus Casper, Oliver Gronz
144 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-88721-341-1
DOI: 10.14617/for.hydrol.wasbew.36.16
- Heft 37.16 Wasserressourcen – Wissen in Flussgebieten vernetzen
Beiträge zum Tag der Hydrologie am 17./18. März 2016 in Koblenz, ausgerichtet von der Hochschule Koblenz und der Bundesanstalt für Gewässerkunde
Herausgeber: Gabriele Wernecke, Anna-Dorothea Ebner von Eschenbach, Yvonne Strunck, Lothar Kirschbauer, André Müller
444 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-88721-342-8
DOI: 10.14617/for.hydrol.wasbew.37.16
- Heft 38.17 Den Wandel messen – Wie gehen wir mit Nichtstationarität in der Hydrologie um?
Beiträge zum Tag der Hydrologie am 23./24. März 2017 an der Universität Trier
Herausgeber: Markus Casper, Oliver Gronz, Rita Ley, Tobias Schütz
372 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-88721-475-3
DOI: 10.14617/for.hydrol.wasbew.38.17
- Heft 39.18 M³ - Messen, Modellieren, Managen in Hydrologie und Wasserressourcenbewirtschaftung
Beiträge zum Tag der Hydrologie am 22./23. März 2018 an der Technischen Universität Dresden
Herausgeber: Niels Schütze, Uwe Müller, Robert Schwarze, Thomas Wöhling, Jens Grundmann
393 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-88721-606-1
DOI: 10.14617/for.hydrol.wasbew.39.18
- Heft 40.18 Starkregen und Sturzfluten – Erfassen, Erforschen, Evaluieren.
Beiträge zum Seminar am 6. Juni 2018 an der Technischen Universität München.
Herausgeber: Markus Disse, Maria Kaiser
92 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-88721-665-8
DOI: 10.14617/for.hydrol.wasbew.40.18

- Heft 41.19 Information und Organisation in der hydrologischen Forschung und Praxis.
Beiträge zum Tag der Hydrologie am 28./29. März 2019 am Karlsruher Institut für Technologie.
Herausgeber: Erwin Zehe, Kirsten Hennrich, Uwe Ehret, Sibylle Hassler, Manuela Nied,
Ulrike Scherer
166 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-88721-821-8
DOI: 10.14617/for.hydrol.wasbew.41.19
- Heft 42.20 Hydrologie: Verbindung der Umweltsphären und -disziplinen.
Eingereichte Beiträge zum geplanten Tag der Hydrologie 2020 in Potsdam.
Herausgeber: Axel Bronstert, Björn Felix Guse, Theresa Blume, Fred Fokko Hattermann,
Sascha Oswald, Annegret Thieken
96 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-88721-958-1
DOI: 10.14617/for.hydrol.wasbew.42.20

Die angegebenen Preise beziehen sich auf die gedruckte Version der Hefte. Mitglieder der Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften erhalten einen Nachlass von 20 %. Die digitale Ausgabe ist unter <http://www.fghw.de> kostenfrei verfügbar.