FORUM FÜR HYDROLOGIE UND WASSERBEWIRTSCHAFTUNG

HEFT 43.22

Im Wandel – Klima, Wasser und Gesellschaft: Prozesse – Methoden – Kommunikation.

Beiträge zum Tag der Hydrologie am 22./23. März 2022 in München

Markus Disse, Ralf Ludwig, Markus Reisenbüchler

Hydrologische Wissenschaften
Fachgemeinschaft in der DWA

FORUM FÜR HYDROLOGIE UND WASSERBEWIRTSCHAFTUNG

HEFT 43.22

Im Wandel – Klima, Wasser und Gesellschaft: Prozesse – Methoden – Kommunikation.

Beiträge zum Tag der Hydrologie am 22./23. März 2022 in München

Markus Disse, Ralf Ludwig, Markus Reisenbüchler

Veranstalter:

≈ Technische Universität München, Lehrstuhl für Hydrologie und Flussgebietsmanagement

≈ Ludwig-Maximilian-Universität München, Lehr- und Forschungseinheit Hydrologie und Fernerkundung

≈ Technische Universität München, Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft

≈ Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften in der DWA (FgHW), Hennef

≈ Hauptausschuss Hydrologie und Wasserbewirtschaftung der DWA

≈ Deutsche Hydrologische Gesellschaft (DHG)

Hydrologische Wissenschaften
Fachgemeinschaft in der DWA

Markus Disse, Ralf Ludwig, Markus Reisenbüchler (Herausgeber)

Im Wandel - Klima, Wasser und Gesellschaft: Prozesse – Methoden – Kommunikation.

Beiträge zum Tag der Hydrologie am 22./23. März 2022 in München

Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung; Heft 43.22

ISBN: 978-3-96862-213-2
DOI: 10.14617/for.hydrol.wasbew.43.22

Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften, 2022

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

Univ.-Prof. Dr. Robert Jüpner
Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften in der DWA

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

Schriftleitung:
Dr. Christian Reinhardt-Imjela

Umschlaggestaltung:
Dorit Steinberger, Ohlstadt

Umschlagbearbeitung:
Christiane Krieg (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 extremen Flut- und Dürreereignisse in Europa, aber auch der sechste Assessment Report des IPCC haben uns klar vor Augen geführt, dass Wasserressourcen und gesellschaftliches Handeln voneinander abhängig sind und sich gegenseitig beeinflussen. Insbesondere eine angepasste und nachhaltige Wasserbewirtschaftung kann die negativen Auswirkungen des Klimawandels abschwächen. Die Hydrologie schafft hierbei die fachlichen Grundlagen für den Dialog zwischen Fachleuten, Politikern und den Betroffenen und unterstützt somit zielführende und nachhaltige Entscheidungen.

Der Tag der Hydrologie 2022 fand am internationalen Tag des Wassers in Garching bei München statt, im neuen Forschungszentrum GALILEO. Als Leitthema wurde „Klima, Wasser und Gesellschaft“ definiert, mit dem Ziel, die folgenden verschiedenen Fragestellungen zu diskutieren und beleuchten:

- Modellierung und Vorhersage von extremen Ereignissen
- Nicht-stationäres Verhalten hydrologischer Prozesse
- Auenreaktivierung – Synergien von Hochwasser- und Naturschutz
- Water-Food-Energy-Nexus

Die diesjährigen Ausrichter waren das Department für Geographie der Ludwigs-Maximilians-Universität (LMU), sowie der Lehrstuhl für Hydrologie und Flussgebietsmanagement und der Lehrstuhl für Wasserbau der Technischen Universität München. Weiterhin fungierten folgende Institutionen als Mitveranstalter: die Deutsche Hydrologische Gesellschaft (DHG), die Fachgemeinschaft hydrologische Wissenschaften (FghW), und der Hauptausschuss Hydrologie und Wasserbewirtschaftung der DWA.

Die Corona-Pandemie war, wie in den vergangenen 2 Jahren, auch diesmal ein prägendes Element in der Planung der Tagung. Bis zuletzt war nicht abzusehen, ob und wie die Konferenz stattfinden kann. Doch letztlich ist es uns gelungen, eine zweitägige Veranstaltung mit 262 Teilnehmern und 16 Ausstellern in Präsenz zu organisieren. 40 Vorträgen und 72 Postern wurden präsentiert und intensiv diskutiert. Die Exkursion ins Freisinger Moos und in das Leibnitz Rechenzentrum waren ebenfalls sehr stark besucht. Wir freuen uns, dass wir Ihnen darüber hinaus den Tagungsband mit einigen ausgearbeiteten Fachbeiträge präsentieren können. Das Book-of-Abstracts ist unter diesem Link erhältlich: https://tdh2022.hydrologie.ed.tum.de/download/. Die Folien der Vorträge finden Sie zusätzlich hier: https://tdh2022.hydrologie.ed.tum.de/vortrag/

Wir bedanken uns an dieser Stelle bei allen Veranstaltern und Helfern des Tags der Hydrologie 2022, bei allen Beitragenden und insbesondere bei den Ausstellern und den Sponsoren. Dank euch war der traditionsreiche Tag der Hydrologie wieder eine Plattform für spannende Diskussion und Wissensaustausch. Wir freuen uns schon sehr auf den Tag der Hydrologie 2023 an der Universität und Hochschule Bochum sicherlich wieder in Präsenz!

Markus Disse, Ralf Ludwig und Markus Reisenbüchler

Heft 43 2022 Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung

Im Wandel – Klima, Wasser und Gesellschaft
Prozesse – Methoden – Kommunikation

Steinbrich, A., Hänsler, A., Leistert, H., Weiler, M.
Benchmark-Datenbank für Starkregenereignissen in kleinen Einzugsgebieten 5

Ramsauer, T., Marzahn, P., Ludwig, R.
Ableitung stündlicher Bodenfeuchtewerte basierend auf RADOLAN Wetterradar Daten 17

Büche, T., Winkler, M., Gampe, D.
Niederschlags-Abfluss-Modellierung des Kalkgrabens – Vergleich verschiedener Ansätze zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen für ein kleines Einzugsgebiet 25

Hübner, G., Schwandt, D., Schlüsener, M., Wick, A.
Transport organischer Spurenstoffe in der Elbe beim Niedrigwasser 2019 35

Feistel, U., Kettner, S., Ebermann, J., Müller, F., Werisch, S.
Wie PV-Freiflächenanlagen den Bodenwasserhaushalt verändern – Begleitforschung im größten Solarpark Deutschlands 43

Bormann, H., Spiekermann, J., Kebschull, J., Kramer, N., Meyerdirks, J., Schall, P.
Entwicklung von Konzepten für ein Binnenhochwasserrisikomanagement in den nordwestdeutschen Küstenniederungen 53

Zeunert, S., Schwenkel, J., Schöniger, M., Meon, G.
Vergleichende Modellierung von Maßnahmen zur Minderung des Pestizidaustrags auf der Einzugsgebietsskala mit den Modellen SWAT und ZIN-AgriTra 63

Natho, S., Tschikof, M., Hein, T.
Bedeutung der Flusseintiefungen für Auenreaktivierungen – eine nährstoffbasierte Perspektive 73

Koltermann da Silva, J., Burrichter, B., Quirmbach, M.
Vorhersagemodelle in KIWaSuS: Vorverarbeitungsschritte für die Entwicklung von KI-Modellen 81

Einfalt, T., Jasper-Tönnies, A., Jessen, M.
Bewertung von Niederschlagsextremereignissen auf Basis von Radardaten 91

Benchmark-Datenbank für Starkregenereignissen in kleinen Einzugsgebieten

Andreas Steinbrich, Andreas Hänsler, Hannes Leistert, Markus Weiler

Zusammenfassung

Sommerliche Starkregenereignisse sind durch ein räumlich sehr begrenztes lokales Auftreten charakterisiert. Dadurch sind oftmals nur kleine Einzugsgebiete (< 10-30 km^2) vollständig von solchen Ereignissen betroffen. Für Einzugsgebiete dieser Skale sind jedoch, außer in wenigen Forschungseinzugsgebieten, nur selten kontinuierliche Abflussmessreihen vorhanden. Daher beruhen die für Baden-Württemberg, aber auch in vielen anderen Ländern verfügbaren Hochwassergefahrenkarten und regionalisierten Hochwasserscheitelwerte überwiegend auf Pegel-Messreihen mesoskaliger Einzugsgebiete mit Größen deutlich über 10 km^2. Da räumlich begrenzte Starkregenereignisse nur eine untergeordnete Rolle bei der Hochwasserentstehung in diesen mesoskaligen Gebieten spielen, ist eine Übertragung der ermittelten Hochwasserkennwerte auf kleine Gebiete problematisch.

Um die Datenlage und damit einhergehend das Prozessverständnis für durch Starkregen induzierte Hochwasserereignisse in kleinen Einzugsgebieten zu verbessern, wird derzeit an der Professur für Hydrologie Freiburg im Auftrag der LUBW eine Benchmark-Datenbank aufgebaut. Dazu werden einerseits bestehende Mess- und Beobachtungsdaten aus kleinen Einzugsgebieten zusammengetragen und andererseits hydrologische Modelle für diese Gebiete parametrisiert und angewendet. Einen Mehrwert stellt hierbei die Einbindung von kontinuierlichen Wasserstanddaten aus Hochwasserrückhaltebecken, die seit 10-20 Jahren zur Verfügung stehen, dar. Gleichzeitig werden aber auch visuelle Informationen aus Bildern und Videos sowie aus Schadensberichten halbquantitativ in die Datenbank einfließen.

Die Starkregenereignisse werden anhand von 5-Minuten-Radar-Niederschlagsdaten sowie durch Niederschlags-Stationsdaten verschiedener Quellen in der Datenbank charakterisiert. Es wird dabei auch gezielt nach Starkregenereignissen gesucht, die keine extreme Abflussreaktion hervorgerufen haben. Dies dient der Identifikation von gebieten bzw. Gebietseigenschaften, die eine eher geringe Sensitivität für solche Ereignisse zeigen. In diesem Beitrag wird der bisherige Umfang der Datenbank sowie die ersten Analysen der bisher erfassten Ereignisse vorgestellt.

1. Hintergrund

Zur Abschätzung der Gefährdung durch Hochwasser stehen in Baden-Württemberg mehrere Datensätze zur Verfügung. Diese sind:

(i) Hochwasser-Gefahren-Karten: Die Karten bilden die zu erwartenden Überflutungsflächen und die höhen für Hochwasser der Widerkehr-Intervalle 10, 30, 100 Jahre und für ein „extremes“ Ereignis entlang von Flüssen ab.

(ii) Regionalisierten Hochwasser-Scheitelwerte (LUBW 2015): Diese Datenbank beinhaltet Scheitelwerte verschiedener Wiederkehrintervalle für alle Basisgebiete des gewässerkundlichen Flächenverzeichnisses. Aufgrund von Abflussmessreihen von rund 400 Pegeln in Baden-Württemberg wurden die Scheitelwerte für verschiedener Wiederkehrintervalle mittels zugrundeliegender Gebietseigenschaften in einem multivariates Regressionsverfahren auf alle Basisgebiete übertagen.

(iii) Oberflächen-Abfluss-Kennwerte (OAK) (LUBW 2016): Die OAK repräsentieren flächendeckend für das Land Baden-Württemberg die aus Starkregenereignissen resultierenden Oberflächenabflüsse. Die OAK wurden für das Kommunale Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg mit dem Modell RoGeR (Steinbrich et al. 2016) flächendeckend, in einer räumlichen Auflösung von 5*5m^2 und einer zeitlichen Auflösung von 5 Minuten erstellt. Die OAK dienen als Eingangsdaten für die Modellierung der Oberflächenabflüsse bei Starkregen. Die 1h-Niederschläge der Wiederkehr-Intervalle 30 und 100 Jahre sowie ein extremes 1h-Ereignis (127.5 mm). Die resultierenden Oberflächen-Abfluss-Kennwerte (OAK) werden seit 2016 von

Ingenieur-Büros im Auftrag von Gemeinden genutzt und anhand von hydraulischen Modellen die zu erwartende Hochwasserbelastung auch abseits von Gewässern zu ermitteln.

Im Laufe der Nutzung der OAK hat sich allerdings immer wieder gezeigt, dass die anhand der OAK hydraulisch modellierten Abfluss-Scheitel deutlich höher ausfallen können als die der regionalisierten Hochwasser-Scheitelwerten entsprechender Wiederkehr-Intervalle. Daraus ergab sich die Frage nach der Ursache der Unterschiede und inwiefern die OAK- bzw. die regionalisierten Hochwasserscheitelwerte für die Fragestellung des Starkregen-Managements valide sind.
Ein Grund könnte in der räumlichen Auflösung der verursachenden sommerlichen konvektiven Starkregenereignissen liegen. Die räumliche Ausdehnung sommerlicher Starkregen ist verbunden mit der typischen Ausdehnung der verursachenden Gewitterzellen. Dadurch werden jedoch oft nur kleine Einzugsgebiete (< 30 km^2) vollständig von solchen Ereignissen betroffen (Lengfeld et al. 2019) (Abbildung 1).

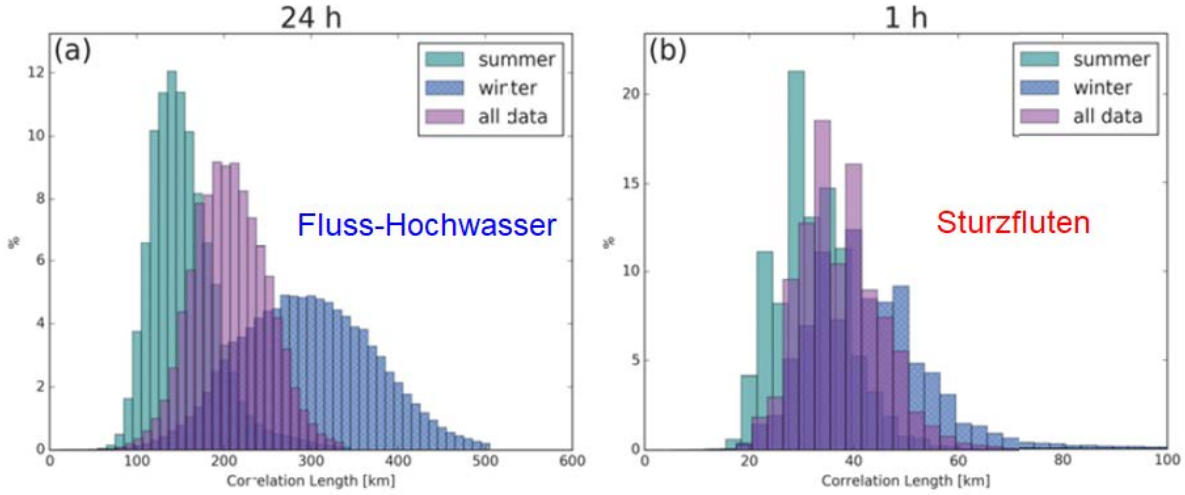


Abb. 1: Histogramm der Korrelationslänge für die Dauer 1 Tag (links) und 1 Stunde (rechts) aus Radardaten von 2001 bis 2016, für das gesamte Jahr (pink), die Sommermonate Juni, Juli und August (grün) und die Wintermonate Dezember, Januar und Februar (blau). Aus Lengfeld et al. 2019 geändert.

Für Einzugsgebiete dieser Skale sind, mit Ausnahme weniger Forschungseinzugsgebiete, jedoch nur selten kontinuierliche Abflussmessreihen vorhanden. Die Grundlagen für die in Baden-Württemberg verfügbaren Hochwassergefahrenkarten und die regionalisierten Hochwasser-Scheitelwerte beruhen daher überwiegend auf Pegel-Messreihen mesoskaliger Einzugsgebiete mit Größen deutlich über 10 km^2 (Abbildung 2). Extreme Hochwasserereignisse in meso-skaligen Einzugsgebieten entstehen allerdings eher durch langanhaltende, räumlich ausgedehnte Niederschläge. Lokal begrenzte Starkregenereignisse spielen dagegen nur eine untergeordnete Rolle bei der Hochwasserentstehung in diesen Gebieten. Eine Übertragung der regionalisierten Scheitelwerte auf diese kleinen Gebiete kann daher grundsätzlich als problematisch angesehen werden.

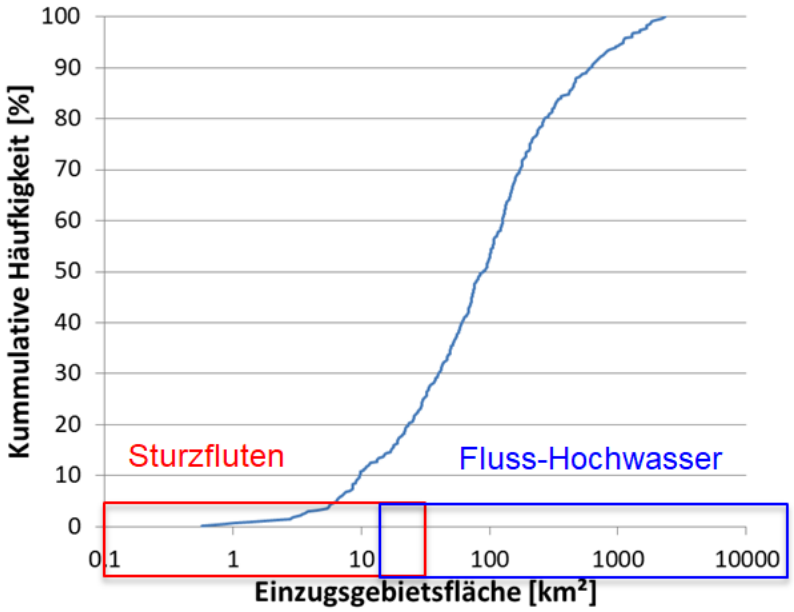


Abb. 2: Häufigkeitsverteilung der Flächengröße der für die Regionalisierung der Hochwasser-Kennwerte verwendeten Pegel. Zusätzlich sind die typischen Skalen von EZGs die durch Sturzfluten bzw. durch Flusshochwasser betroffen sind dargestellt.

Um die Datenlage und das Prozess-Verständnis für, durch Starkregen induzierte, Hochwasserereignisse in kleinen Einzugsgebieten zu verbessern wird an der Professur für Hydrologie Freiburg (PHF) im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) eine Benchmark-Datenbank für kleine EZGs aufgebaut.

2. Aufbau der Benchmarkdatenbank

2.1 Gebietsauswahl und Datengrundlage

Der erste Schritt zum Aufbau der Datenbank besteht in der Suche geeigneter kleiner Einzugsgebiete. Diese sollten kleiner als 30 km² und es sollen Mess- oder Beobachtungsdaten zu Starkregen-Ereignissen vorhanden sein. Diese sind im besten Fall Abflussdaten hoher zeitlicher Auflösung (mindestens 15 Minuten) aus Pegelmessungen und Niederschlag-Aufzeichnungen von Niederschlag-Messstellen im Einzugsgebiet in hoher zeitlicher Auflösung. Aber auch kontinuierliche Wasserstand-Messungen in Hochwasser-Rückhaltebecken in Verbindung mit den Becken-Parametern, nach Starkregen-Ereignissen beobachtete Geschwemmsel-Marken oder Schadensmeldungen können dazu herangezogen werden, um zumindest Abflussscheitelwerte abzuschätzen. Hinsichtlich des Niederschlags werden zusätzlich zu Stationsdaten auch flächenhaft vorliegende Ereignisdaten aus Radarmessung mit einbezogen. Ein Überblick über die Daten, die in die Datenback einfließen gibt Tabelle1. Aktuell sind die in Abbildung 3 und Tabelle 2 vorgestellten Einzugsgebiete Gegenstand der Datenbank.

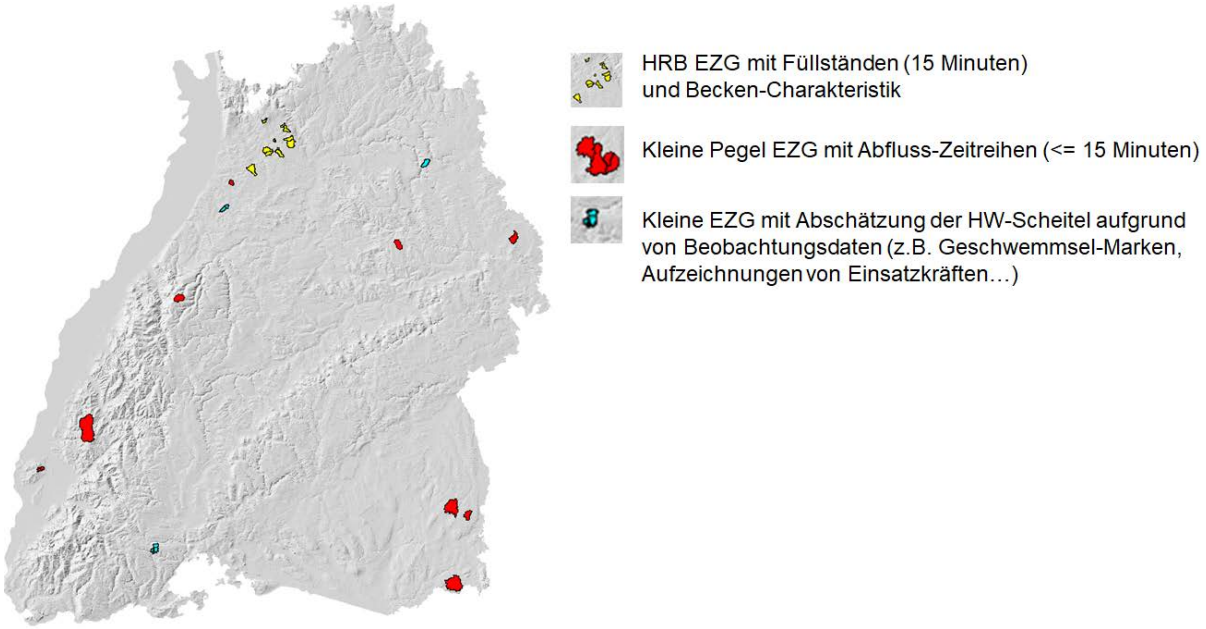


Abb. 3: Lage der, aktuell in der Benchmark-Datenbank erfassten, Einzugsgebiete.

Tab. 1: Datengrundlage für die Benchmarkdatenbank

Daten	**Quellen**
Abflussdaten mit hoher zeitlicher Auflösung	LUBW-Pegel, Pegel aus hydrologischen Forschungsgebietern (KIT, PHF)
Scheitelwerte der Abflusszeitreihen	LUBW
Wasserstand-Daten aus Hochwasserrückhaltebecken	Ingenieur-Büros
Wasserstand-Volumen-Abfluss-Beziehungen für die Hochwasser-Rückhaltebecken	Ingenieur-Büros
Geschwemmsel-Marken, Beobachtungen, Schadensmeldungen, Aufzeichnungen von Einsatzkräften	Gemeinden, Feuerwehren, Privatpersonen, etc.
Niederschlag-Stationsdaten mit hoher zeitlicher Auflösung	DWD, KIT, PHF, private, etc.
Niederschlag-Radardaten mit hoher zeitlicher Auflösung	DWD, Meteologix
Regionalisierte Hochwasser-Scheitelwerte für Baden-Württemberg	LUBW
KOSTRA 2010R Starkregen-Katalog	DWD
Bodenfeuchten gegebener Unterschreitungs-Wahrscheinlichkeiten im Sommerhalbjahr (Mai-Oktober)	PHF
Tageswerte der Temperatur und Grasreferenz-Verdunstung	DWD
5*5m² Geo-Daten (nFK, LK, ks, Grundwasserflurabstände, Landnutzung, Versiegelungsgrad, Makroporen-Ausstattung, DGM) als Grundlage für die hydrologischen Modelle	PHF

Tab.2: Aktuell in der Datenbank aufgenommene Einzugsgebiete (P = Pegel-Einzugsgebiet, HRB = Einzugsgebiet eines Hochwasser-Rückhaltebeckens, FG = Flussgebiet).

Fluss	Ort	Typ	Fläche[km²]
Weiherbach	Menzingen	P	3.5
Brotenau	Brotenaubach	P	9.8
Jagst	Lippach-Stockmühle	P	9.8
Blinde Rot	Schadberg	P	8.6
Rappenbach (Haslach)	Kunenberg	P	7.3
Löchernbach	Eichstetten HRB Breitenweg	P	2.4
Pfaffenbach	Eichstetten HRB Steinenweg	P	1.6
Gießbach	Lochhammer	P	30.0
Ölbach	Hirschbronn-Zulauf	P	25.0
Schutter	Wittelbach	P	49.0
Hilsbach	Adelshof-HRB E44 Essenbusch	HRB	8.8
Oberer Hohengraben	Bargen-HRB A84 Ebertal	HRB	4.4
Wollenbach	Wollenberg-HRB A79	HRB	7.5
Gründleingraben	Neckarbischofsheim-HRB W39 Kappisäck	HRB	0.8
Grunbach	Helmhof-HRB W32 Kryxenberghof	HRB	5.6
Rautalgraben	Plan-Willaredt HRB-S54 Rautal	HRB	3.5
Orlacher Bach	Braunsbach	FG	9.7
Riedgraben	Bretten Diedelsheim	FG	3.0
Gölsheimer Dorfbach	Bretten Gölsheim	FG	7.3
NN-TS9	Bonndorf Steinsäge	FG	1.1
NN-JK6	Bonndorf Luisenruhe	FG	1.0
Ehrenbach	Bonndorf	FG	3.1
NN-TO3	Bonndorf Boll	FG	2.6

Da Abflusszeitreihen der LUBW mit einer zeitlichen Auflösung von 15 Minuten erst ab 2016 vorliegen hat sich die Untersuchung zunächst auf die Zeit ab 2016 beschränkt. Für den Zeitraum vor 2016 liegen bei der LUBW nur Stundenmittelwerte vor. Für das Jahr 2021 lagen zum Zeitpunkt der Verfassung dieses Artikels noch keine 5-Mintuen-Niederschlags-Radardaten des DWD vor. So konnten die Starkregen-Ereignisse des Jahres 2021 noch keinen Eingang in die vorliegende Untersuchung finden.

2.2 Aufbereitung von Starkregenereignisse für die Datenbank

Für alle ausgewählten Gebiete wurden die folgenden Arbeitsschritte durchgeführt:

- Sichtung der Beobachtungs-Zeitreihen (Niederschlag und Abfluss) und Auswahl von Ereignissen
- Abschätzung von Abfluss-Scheitelwerten aus Beobachtungsdaten (wenn keine Messdaten vorhanden sind)
- Ableitung von Zufluss-Ganglinien aus Beckenfüllständen und den Beckencharakteristika von Hochwasser-Rückhaltebecken.

- Charakterisierung und Einordnung der Ereignisse bezüglich Niederschlag, Abfluss und Bodenfeuchte
- Modellierung mit RoGeR_dyn und FGM

3. Charakterisierung der Ereignisse

Es werden zur Charakterisierung der Ereignisse folgende Parameter erhoben:

- Niederschlaghöhe [mm] und Dauer [Minuten] (als Gebietsmittelwerte)
- Wiederkehr-Intervall [a] des Gebiets-Niederschlags für verschiedene Dauerstufen
- Mittlere und maximale Intensität des Gebiets-Niederschlags [mm/h]
- Ereignis-Vorfeuchte [% nFK]
- Unterschreitungswahrscheinlichkeit der Ereignis-Vorfeuchte []
- Abflussscheitel [m³/s]
- Wiederkehr-Intervall des Abflussscheitels [a]
- Abflussvolumen [m³]
- Abflusshöhe [mm]
- Abflussbeiwert []

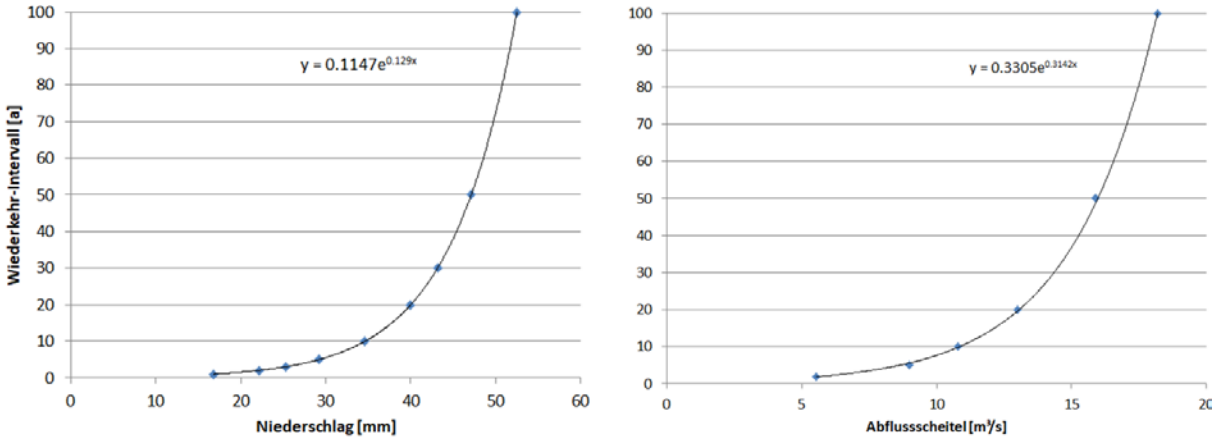
3.1 Ableitung der Wiederkehr-Intervalle

Niederschlag: Für die statistische Einordnung der Ereignis-Niederschläge stehen der auf Stationsdaten basierende, Starkregen-Katalog KOSTRA 2010R des DWD sowie ein räumlich höher aufgelöster, auf Radar-Daten beruhender Datensatz von Bemessungsniederschlagen in zwei unterschiedlichen Ausführungen zur Verfügung. Das Verfahren zur Ableitung von räumlich diskreten Bemessungsniederschlägen auf Basis von Radar-Daten wurde an der Professur für Hydrologie Freiburg (PHF) entwickelt (Hänsler und Weiler 2022).

Für die ausgewählten Gebiete wurden zunächst die mittleren KOSTRA-Niederschlagsummen für alle Dauerstufen und Wiederkehr-Intervalle ermittelt. An diese Werte wurden dann Exponential-Funktionen angepasst (Abbildung 4, links) mit deren Hilfe dann für jedes beobachtete Niederschlagsereignis das Wiederkehr-Intervall ermittelt werden kann. Es werden dazu für jedes beobachtete Ereignis die Wiederkehr-Intervalle aller Dauerstufen abgeleitet und die höchste erreichte Jährlichkeit sowie die zugehörige Dauerstufe für die Charakterisierung des Niederschlag-Ereignisses verwendet.

Da für den radarbasierten Ansatz für jede Radar-Rasterzelle und betrachteten Dauerstufe die Parameter der zugrundeliegenden Extremwertfunktion vorliegen, können die Jährlichkeiten der Ereignisse direkt bestimmt werden. Auch hier erfolgt dann die Wahl der höchsten Jährlichkeit über alle Dauerstufen für das Niederschlagereignis.

Abfluss: Aus den regionalisierten Hochwasser-Kennwerten werden für die ausgewählten Einzugsgebiete die Scheitelabflüsse der Wiederkehr-Intervalle 2, 5, 10, 20, 50, 100 Jahre ermittelt und analog dem Vorgehen für die KOSTRA Daten, für die Einordnung der beobachteten Ereignisse eine Exponential-Funktion angepasst (Abbildung 4, rechts).



KOSTRA N-Dauerstufe 60 Minuten

Regionalisierte Hochwaser-Scheitelwerte

Abb. 4: Vorgehens zur Anpassung einer stetigen Funktion zur Ableitung der Wiederkehr-Intervalle der Niederschlagereignisse basierend auf KOSTRA (links) und der Abflussereignisse (rechts) am Beispiel des Einzugsgebietes des Pegels Schadberg/Blinde Rot.

3.2. Erste Ergebnisse

Bislang wurden 25 Ereignisse in den kleinen Einzugsgebieten mit Pegel-Messungen bezüglich Niederschlag und Abfluss charakterisiert. In Abbildung 5 sind für diese Ereignisse die Wiederkehr-Intervalle der beobachteten Abflussscheitel den (über alle Dauerstufen) maximalen Wiederkehr-Intervallen des Niederschlags gegenübergestellt. Auf den ersten Blick fällt auf, dass die Wiederkehr-Intervalle der Scheitelwerte des Abflusses mit wenigen Ausnahmen (Ereignis 2, 12, 16 und 22) deutlich über den maximalen Wiederkehr-Intervallen des auslösenden Niederschlags liegen. Nur in einem Fall (Ereignis 22) liegen alle ermittelten Wiederkehr-Interfalle für den Niederschlag deutlich über dem des Scheitel-Abflusses. Bemerkenswert ist, dass die Ereignisse 1-4 alle im Forschungseinzugsgebiet des KIT Menzingen/Weiherbach zwischen 1994 und 2008 stattgefunden haben. Dies entspricht drei Ereignissen mit Abfluss-Scheiteln der Wiederkehr-Intervalle >1000 Jahre und eines mit einem Wiederkehrintervall >10 Jahre innerhalb von 14 Jahren. Auch für die Niederschläge werden für zwei Ereignisse mit allen drei Verfahren innerhalb dieser 14 Jahre Wiederkehr-Intervalle deutlich größer als 100 Jahre ermittelt.

Die zweite „Serie“ extremer Abfluss-Ereignisse > 1000 Jahre wurde in den beiden Forschungs-Einzugsgebieten der Professur für Hydrologie Freiburg (Löchernbach und Pfaffenbach) gemessen. Die beiden Gebiete liegen direkt benachbart im Kaiserstuhl. Die Ereignisse 15-21 wurden alle im Jahr 2018 aufgezeichnet. Die Abflussreaktionen der Nummern 15 und 16 sowie 17 und 18 beziehen sich jeweils auf die beiden gleichen Niederschlagsereignisse. Während das eine der beiden Gebiete beim ersten Ereignis schon extrem reagiert, erreicht der Abfluss-Scheitel im Nachbargebiet „nur“ ein Wiederkehr-Intervall von 20 Jahren, was auch etwa der des Niederschlags entspricht. Die Ereignis-Nummern 17 und 18 sind die Reaktion auf ein Starkregenereignis, das nur eine Woche später in den beiden Gebieten stattfand. Hier lag das Wiederkehr-Intervall des Niederschlags bei etwa 10 Jahren. Das Widerkehr-Intervall der Abflussscheitel in beiden Gebieten lag entsprechend der regionalisierten Hochwasser-Scheitel deutlich über 1000 Jahre. Direkt am Folgetag ereignete sich erneut ein Niederschlags-Ereignis

mit einem Widerkehr-Intervall <1 Jahr das zu den Abflussreaktionen 19 und 20 führte. Aufgrund der hohen Vorfeuchte führte dieser relativ moderate Niederschlag wahrscheinlich dann zu den extremen Abflussreaktionen. Wieder zwei Tage später ereignete sich im Kaiserstuhl das nächste Starkregenereignis das aufgrund der Vorgeschichte trotz eines geringen Wiederkehr-Intervalls (<1 Jahr) in einem der beiden Gebiete erneut ein extremes Abflussereignis auslöste (Nummer 21). Das zweite Gebiet war in diesem Fall nur am Rande von dem Niederschlag-Gebiet betroffen und zeigte daher keine nennenswerte Abflussreaktion. Bezüglich der Einordnung der Wiederkehr-Intervalle des Niederschlags fällt auf, dass die aufgrund der radarbasierten Bemessungsniederschläge der PHF meist höhere Wiederkehr-Intervalle der gemessenen Ereignisniederschläge ermittelt wurden als aufgrund von KOSTRA.

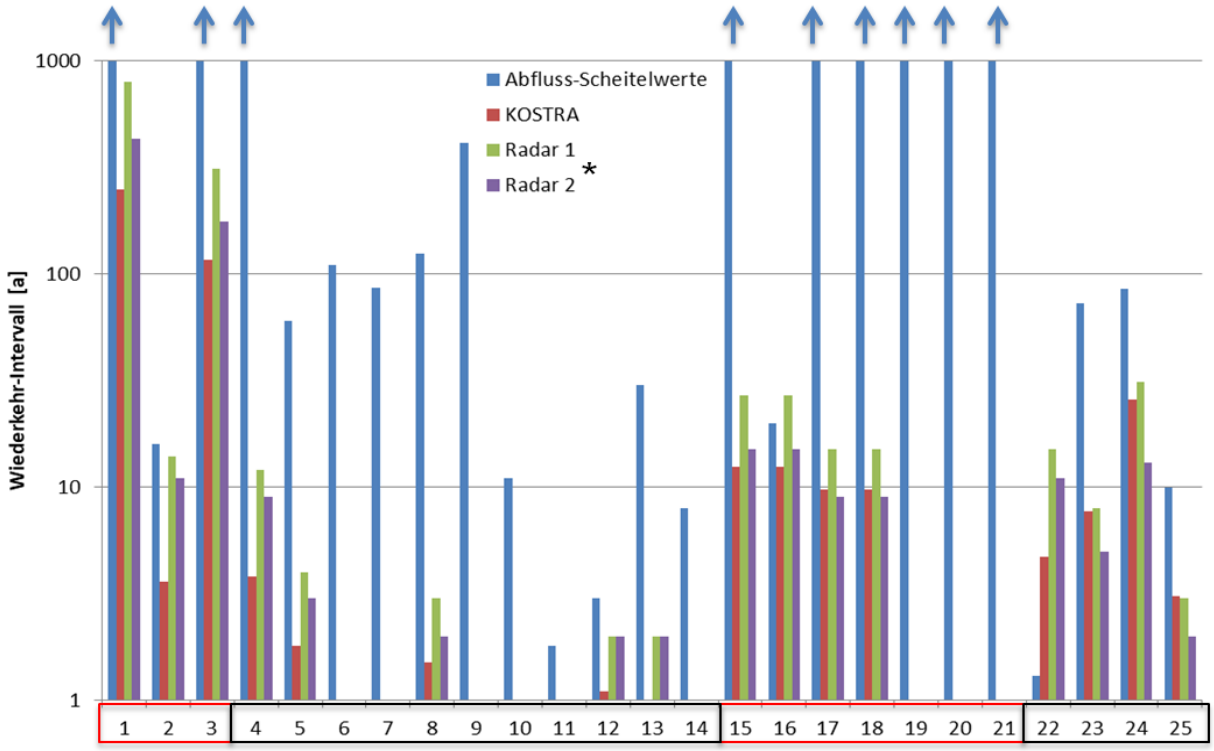
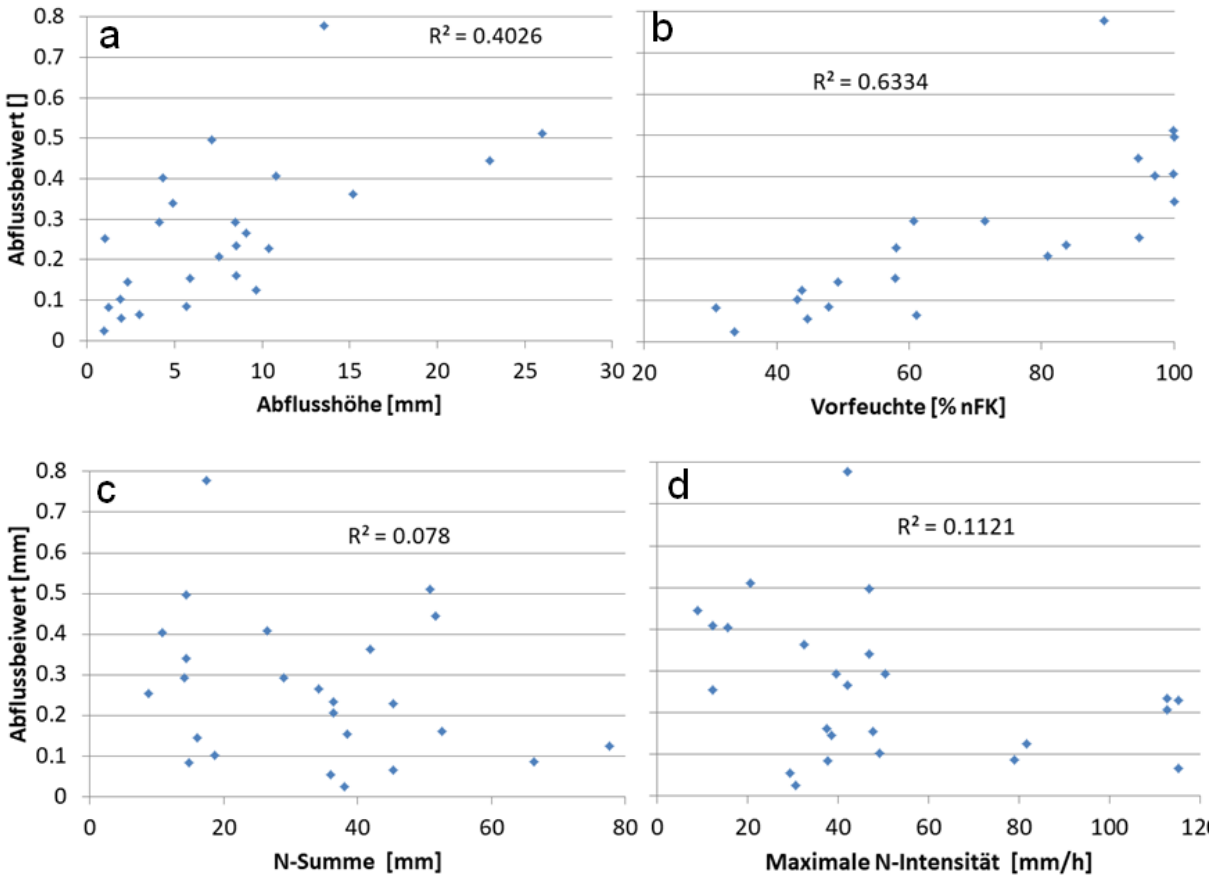


Abb. 5: Gegenüberstellung der Widerkehr-Intervalle (Skale der Y-Achse) für die beobachteten Abfluss-Scheitel entsprechend der regionalisierten Scheitel-Abflüsse (blaue Balken), mit den Wiederkehr-Intervallen des auslösenden Niederschlags entsprechend KOSTRA (rote Balken) und den beiden PHF-Ansätze (grün und violette Balken). Ereignisse, mit Widerkehr-Intervallen <= 1 Jahr werden aufgrund der logarithmischen Skalierung der Y-Achse nicht dargestellt. Auf der X-Achse sind die Ereignisse durchnummeriert von 1-25 aufgetragen. Für schwarz umrandete Ereignisse lagen nur Radar-Daten des Niederschlags vor. Für rot umrandete Ereignisse waren Stationswerte aus den Einzugsgebieten verfügbar. Die Pfeile oberhalb der 1000-Jahr-Linie deuten an, dass das, anhand der angepassten Exponential-Verteilung errechnete, Wiederkehrintervall des Abflussscheitels deutlich über 1000 Jahre lag.

In Abbildungen 6a bis 6e sind die Ausprägungen der Abflussbeiwerte gegen die anderen Ereignis-Charakteristika wie Abflusshöhe (a), Vorfeuchte (b), Niederschlag-Menge (c), maximale Niederschlag-Intensität (d) und Niederschlag-Dauer (e) für die 25 Ereignisse visualisiert und

der entsprechende Korrelationskoeffizient berechnet. Es zeigt sich ein starker Zusammenhang zwischen den Abflussbeiwerten und der Abflusshöhe (a) sowie der Vorfeuchte (b). Insbesondere die Vorfeuchte hat eine sehr deutliche Auswirkung auf die Abflussbeiwerte (r^2 = 0.63). Hier sind nur 22 Ereignisse erfasst, da für die verbleibenden 3 noch keine Vorfeuchte ermittelt werden konnte. Die 11 Ereignisse mit Vorfeuchte > 70% nFK sind die Ereignisse mit den Nummern 6, 7, 9 bis 12 und 17 bis 21 in Abb. 5. Mit Ausnahme von Ereignis Nr. 12 liegen hier die Wiederkehrintervalle der Abflussscheitel sehr deutlich über denen des auslösenden Niederschlags. Die Wiederkehrintervalle des Niederschlags waren in 8 dieser 12 Ereignisse kleiner als ein Jahr. Bei hoher Vorfeuchte können, wie es scheint, auch weinig extreme Starkregen zu extremen Abflussreaktionen führen. Die Niederschlags-Höhe (c) und die maximale Niederschlag-Intensität (d) erklären dagegen die Ausprägung der Abflussbeiwerte nur schlecht. Ebenso spielt die Ereignisdauer (21 der 25 Ereignisse waren kürzer als 3h, 3 Ereignisse waren deutlich länger) eine untergeordnete Rolle.



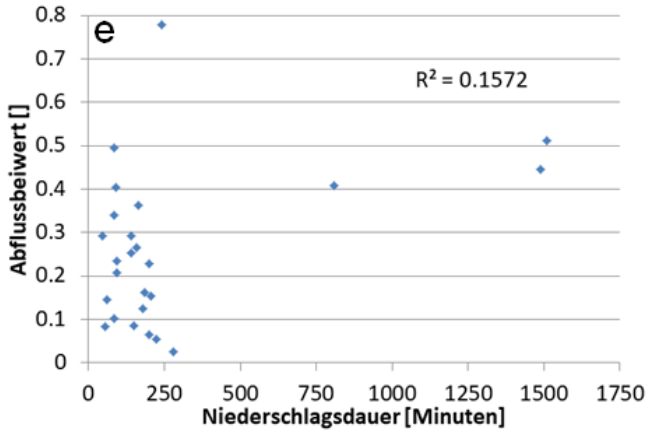


Abb. 6: Darstellung der Abflussbeiwerte gegen verschiedene Ereigniskenngrößen. Der entsprechende R^2 ist im jeweiligen Diagramm eingefügt.

4. Zusammenfassung

Die Gegenüberstellung der Wiederkehr-Intervalle von Abflussscheiteln und auslösenden Niederschlägen zeigt eindrücklich, dass ein Niederschlag eines gegebenen Wiederkehr-Intervalls nicht zwingend zu einer Abflussreaktion mit vergleichbarem Wiederkehr-Intervall führt. Die bisherigen Ergebnisse weisen darauf hin, dass die Wiederkehr-Intervalle der Abflussscheitel eher höher ausfallen als die der auslösenden Niederschläge. Dabei spielt offenbar die Vorfeuchte eine wichtige Rolle. Bei hoher Vorfeuchte können auch relativ moderate Niederschläge zu extremen Abflussreaktionen führen.

Es gilt allerdings zu berücksichtigen, dass die Häufigkeit von Ereignissen, die auf Basis der regionalisierten Abflussscheitel Wiederkehrintervalle >1000 Jahre aufweisen sehr hoch ist. Dies lässt darauf schließen, dass die Methodik der Regionalisierung der Hochwasser-Scheitel für die hier betrachteten Starkregenereignisse in kleinen Einzugsgebieten und die damit verbunden räumliche und zeitliche Skale nicht adäquat ist.

Eine Benchmark Datenbank für Starkregenereignisse ist eine wichtige Grundlage um einerseits aufgrund der Ereignisse grundlegende Zusammenhänge bei Starkregenereignisse zu erforschen, sie bietet aber auch eine gute Basis um verschiedenen Modelle auf diese Ereignisse anzuwenden um die Modelle zu validieren und Modelle für solche Ereignisse zu verbessern. Die Datenbank soll weitere ausgebaut werden und im Moment werden auch vermehrt Starkregenereignisse definiert, die nur zu geringen oder kleinen Abflussreaktionen führten.

Literatur

Haensler, A. und Weiler, M. 2022: Enhancing the usability of weather radar data for the statistical analysis of extreme precipitation events, Preprint hess-2021-640, https://doi.org/10.5194/hess-2021-640

Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW), 2016: Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg

Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW), 2015: Abfluss-BW. Regionalisierte Abflusskennwerte Baden-Württemberg. Hochwasserabflüsse.

Lengfeld, K., Winterrath, T., Junghänel, T., Hafer, M., Becker, A. 2019: Characteristic spatial extent of hourly and daily precipitation events in Germany derived from 16 years of radar data. In Meteorol. Z. (Contrib. Atm. Sci.), Vol. 28, No. 5, 363–378.

Steinbrich, A., Leistert, H., Weiler, M. (2016): Model-based quantification of runoff generation processes at high spatial and temporal resolution. Environmental Earth Sciences (2016) 75:1423. doi:10.1007/s12665-016-6234-9

Ableitung stündlicher Bodenfeuchtewerte basierend auf RADOLAN Wetterradar Daten

Thomas Ramsauer, Philip Marzahn, Ralf Ludwig

Zusammenfassung

Die Studie präsentiert einen empirischen Algorithmus zur Ableitung realer Bodenfeuchtewerte aus RADOLAN Wetterradar Daten. Ein Vorregenindex wird um Verlustfaktoren erweitert, welche die jeweils lokale Temperatur, den Sättigungszustand sowie die Bodenart miteinbeziehen. Notwendige empirische Faktoren werden an Stationsdaten optimiert. Über die empirischen Zusammenhänge werden die physikalischen Grenzen des Bodenwasserhaushalts eingehalten und die Dynamik der Bodenfeuchte plausibel abgebildet. Im Vergleich zu Messdaten an 23 Stationen, weist das Produkt einen mittleren ubRMSE von unter 4 Vol% auf. Die stündlichen Bodenfeuchtewerte in 1km Auflösung für ganz Deutschland stehen als offener Datensatz zur Verfügung.

1. Einleitung

Bodenfeuchte spielt eine entscheidende Rolle im terrestrischen Wasserkreislauf. Diverse Prozesse auch rund um den Energiehaushalt werden von dieser Zustandsvariable beeinflusst und allgemeine hydrologische Prozesse wie die Abflussbildung hängen vom aktuellen Sättigungszustands des Bodens ab. Auch die Schwere von Extremereignissen wie Hochwasser aber auch landwirtschaftlichen Dürren wird durch den Bodenwasserhaushalt gesteuert und definiert.

Die lokale Bodenfeuchte ist von vielen Einflussfaktoren, wie Bodenart oder Grundwasserstand abhängig, wobei der Hauptfaktor in Deutschland natürlicherweise meist die Niederschlagsmenge ist. Das Wissen um den aktuellen Zustand des Bodenwasserhaushalts, kann helfen, Schadensereignisse vorherzusagen.

Direkt gemessen werden kann die Bodenfeuchte am Punkt mit verschiedenen Sensoren wie der TDR, FDR aber auch Cosmic-Ray Sonden. Die den Bodenarten entsprechend heterogene räumliche Ausprägung kann mit den *in situ* Messmethoden aber nur bedingt erfasst werden. Verteilte Bodenfeuchtewerte werden daher meist modelliert, können aber auch von Fernerkundungsdaten abgeleitet werden. Satellitengestützte Feuchtedaten können von aktiven Mikrowellensatelliten (SAR: z.B. Sentinel-1, TerraSAR-X, Scatterometer: z.B. ERS-1/2, ASCAT) sowie passiven Radiometern (z.B. SMOS) und Thermalsensoren abgeleitet werden. Oftmals werden diese Produkte von Landoberflächenmodellen unterstützt (SMAP Level-4 Produkt). Die Auflösung der Datensätze beschränkt sich meist auf maximal tägliche Werte mit mehreren Kilometern Gitterweite. SAR Systeme können auch räumlich höher aufgelöste Daten liefern, dies aber jeweils nur zur Überflugszeit im Abstand von mehreren Tagen. Allen Mikrowellenprodukten gemein ist, dass das aufgenommene Signal stark von der vorhandenen Vegetation beeinflusst wird. Die Eindringtiefe des Radarsignals ist dabei je nach Wellenlänge und Landoberflächenbeschaffenheit unterschiedlich und liegt im Bereich von wenigen Zentimeter bis Dezimeter.

Niederschlag ist die wichtigste Eingangsvariable im Bodenwasserhaushalt und kann in der Fläche bestimmt werden. In Deutschland liefert das Wetterradarmessnetz des Deutschen Wetterdienstes (DWD) zeitlich und räumlich hochaufgelöste Daten. In dieser Studie wird daher ein empirischer Ansatz vorgestellt, der für ganz Deutschland anhand dieser Niederschlagsdaten

Bodenfeuchte ableitet. Dafür wird ein erweiterter Vorregenindex entwickelt, welcher zusätzlich die lokale Bodentextur und Lufttemperatur miteinbezieht.

2. Methodik

2.1 Erweiterter Vorregenindex

Die ursprüngliche und einfachste Form des Vorregenindex (*Antecedent Precipitation Index, API*) basiert auf folgender Formel (Kohler & Linsley (1951)):

$$API_t = k^* API_{t-1} + P_t \quad (1)$$

mit API = Vorregenindex, k = empirischer Verlustfaktor, P_t = Niederschlag zum Zeitpunkt t

In dieser Studie wird dieser Index erweitert, um tatsächliche Bodenfeuchtewerte zu erlangen. Die aufgenommene Niederschlagsmenge wird über das aktuelle Sättigungsdefizit begrenzt und der empirische Verlustfaktor stark erweitert:

$$API_t = a * b * API_{t-1} + (\theta_{sat} - API_{t-1}) * (1 - e^{-(P_t/d)}) \quad (2)$$

mit a, b = empirischer Verlustfaktor, θ_{sat} = Bodenfeuchte bei Sättigung, d = Tiefe (50mm)

$$a = 1 - ((T/\alpha) * e^{(-0.05 * Ton)}) \quad (3)$$

mit T = Lufttemperatur, α = empirische Variable, Ton = Tongehalt [%]

$$b = e^{(-((API_{t-1} - \theta_{res}) - (\theta_{sat} - \theta_{res}))^\gamma)} \quad (4)$$

mit θ_{res} = Residualfeuchte , γ = empirische Variable

Die Abnahme des APIs von t-1 zu t wird nun durch zwei Faktoren gesteuert. Faktor *a* berücksichtigt die aktuelle Temperatur und Bodencharakteristik, um den vorherigen Bodenfeuchtewert entsprechend zu verringern. Faktor *b* hingegen ist vom Sättigungsgrad des Bodens abhängig und sorgt für eine raschere Abnahme der Bodenfeuchte bei hoher Sättigung. Damit werden wichtige bodenhydrologische Prozesse wie Perkolation und Evaporation, sowie Bodeneigenschaften wie Wasserhaltekapazität empirisch dargestellt. Die jeweilige Sättigungs- und Residualfeuchte basiert auf einer empirischen Beziehung zum Sandgehalt (aus ISBA-Modell, Noilhan & Mahfouf (1996)). Räumlich differenzierte Verlustmuster ergeben sich aus den zusätzlich verwendeten Eingangsdaten. Zur Kalibrierung des Algorithmus werden die Faktoren *α* und *γ* zunächst an allen Messstationen einzeln hinsichtlich des Root Mean Square Errors zwischen den Stationsdaten und den modellierten Daten optimiert. Dieses Vorgehen wird ebenfalls über alle Standorte gemeinsam (gemittelter RMSE als Optimierungsziel) angewendet, um neben dem lokal optimierten API (lAPI) auch das flächendeckende API Produkt zu erzeugen. Eine Kreuzvalidierung mit zufällig ausgewählter Kalibrierungs- und Testgruppe dient der Absicherung der Ergebnisse. Außerdem wird ein Vergleich mit dem renommierten ESA Climate Change Initiative Bodenfeuchteprodukt (ESA CCI SM) gezogen.

2.2 Eingangsdaten

Im Speziellen findet der Wetterradardatensatz RADOLAN (RADOLAN: RADar-OnLine-Aneichung) RW des DWD Anwendung, welcher eine stündliche und räumliche Auflösung von 1x1km aufweist (Bartels (2004)). Die Informationen aus den aufgezeichneten

Radarrückstreuwerten der vorangegangenen Stunde werden dafür aggregiert und mit dem Niederschlagsmessnetz des DWD angeglichen.
Die verwendeten Lufttemperaturdaten stammen aus dem ERA5 Reanalyse-Datensatz (Hersbach et al. 2018). Räumliche Charakteristika der Bodenarten werden aus dem SoilGrids Datensatz entnommen (Hengl et al. (2017)).
Als Kalibrierungs- und Validierungsdaten werden Messdaten von 23 Standorten des TERENO Netzwerks und einer eigenen Feldkampagne verwendet (Zacharias et al. 2011). Abbildung 1 zeigt deren geographische Lage und die zugehörige Bodenartenverteilung.

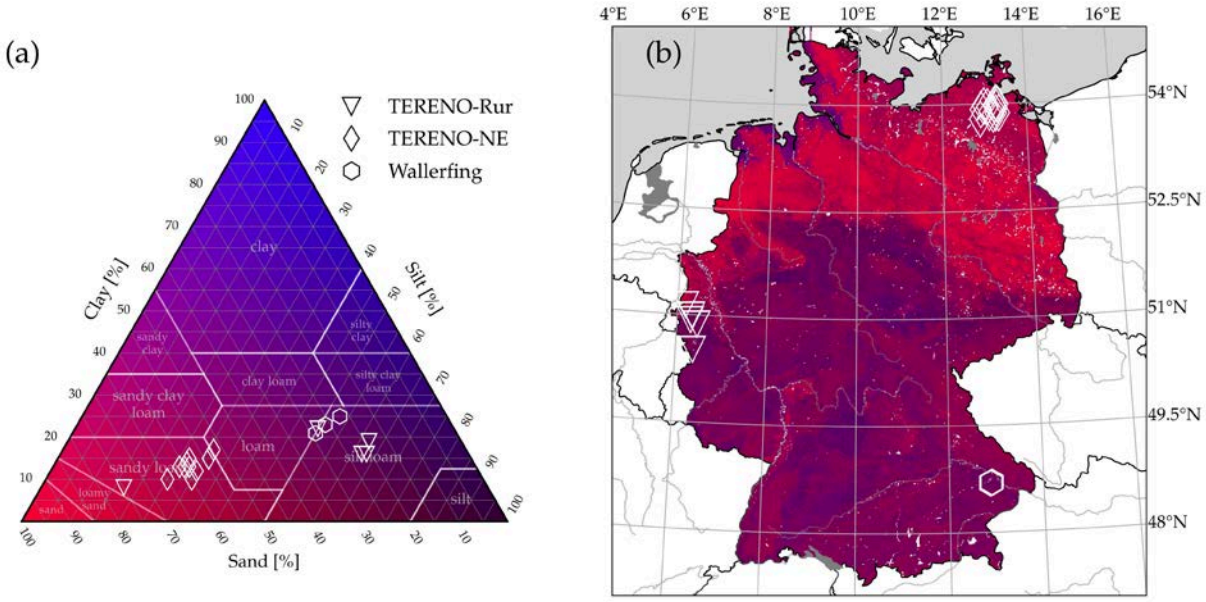


Abb. 1: Bodenartenverteilung (a) und räumliche Lage (b) der Messstationen (Ramsauer et al. (2021))

3. Ergebnisse

Die für Deutschland räumlich abgeleiteten Bodenfeuchtedaten geben die Amplitude und Höhe der gemessenen Stationswerte in guter Genauigkiet wieder. Der API zeigt einen mittleren RMSE von 4,66 Vol% und einen ubRMSE von 3,45 Vol% bei der generellen Optimierung für die 23 Stationen mit einer jeweiligen Standardabweichung von 2,47 Vol% und 2,01 Vol% im Vergleich zu den in-situ Stationsmessungen. Damit liegen die Fehlerwerte unter denen des ESA CCI SM Datensatzes (5.99 Vol% und 4.05 Vol%). Für die lokal optimierten API (lAPI) Zeitreihen ergeben sich geringere Fehlerwerte von 2,84 Vol% ubRMSE (1,27 Vol% Std.). Exemplarisch werden der lAPI, API, und ESA CCI SM Daten den Messwerten für sechs Stationen in Abbildung 2 gegenübergestellt. Zu erkennen ist, dass der rapide Anstieg der Bodenfeuchte durch die empirischen Daten sehr gut getroffen wird, da das hochaufgelöste Wetterradarprodukt hier Eingang findet. Die Saisonalität kann von lAPI Daten sehr gut und von den API Daten vor allem für die sandigeren Standorte ebenfalls sehr gut abgebildet werden.

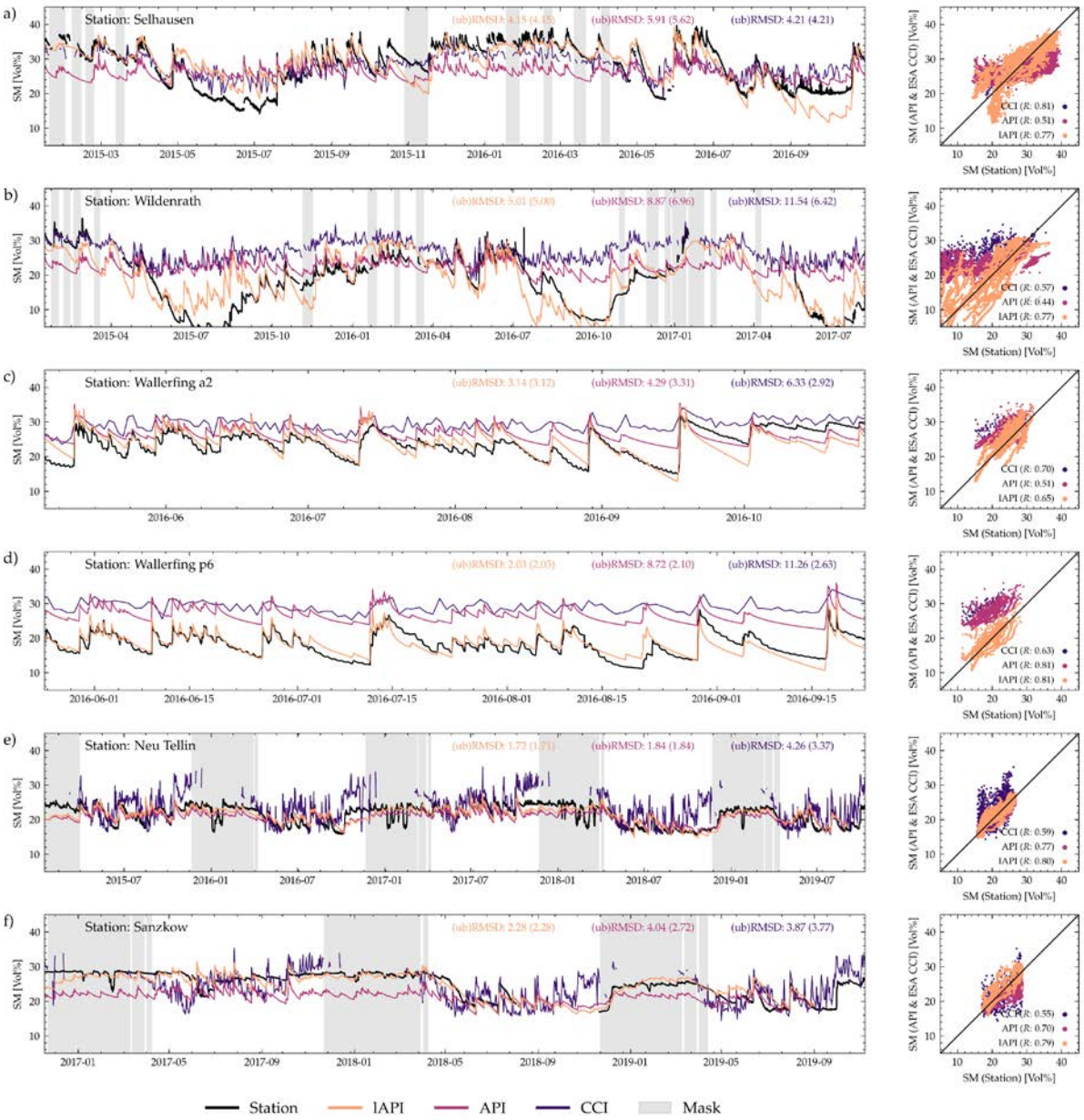


Abb 2: Stationsdaten, API-, IAPI- und ESA CCI SM-Daten und entsprechende Streudiagramme für ausgewählte Stationen Selhausen (a), Wildenrath (b), Wallerfing a2 (c), Wallerfing p6 (d), Neu Tellin (e) und Sanzkow (f) (Ramsauer et al. 2021).

Abbildung 3 zeigt den räumlichen Vergleich mit den ESA CCI SM Daten für die drei Monatsgruppen MAM, JJA, SON und den Mittelwert daraus. Generell ist ein eher negativer Bias des APIs festzustellen, welcher jedoch mit Blick auf den Vergleich mit Stationsmesswerten als meist positive Überschätzung der Bodenfeuchte im ESA CCI SM Produkt zu werten ist. Diese Überschätzung konnte auch für die auffälligen Strukturen entlang der Donau festgestellt werden, welche mit Karstgebieten und flachgründigen und skelettreichen Böden zusammenfallen (Ramsauer et al. 2021). Im Frühjahr sind die höchsten Fehlerwerte und die geringste Korrelation für Mitteldeutschland festzustellen.

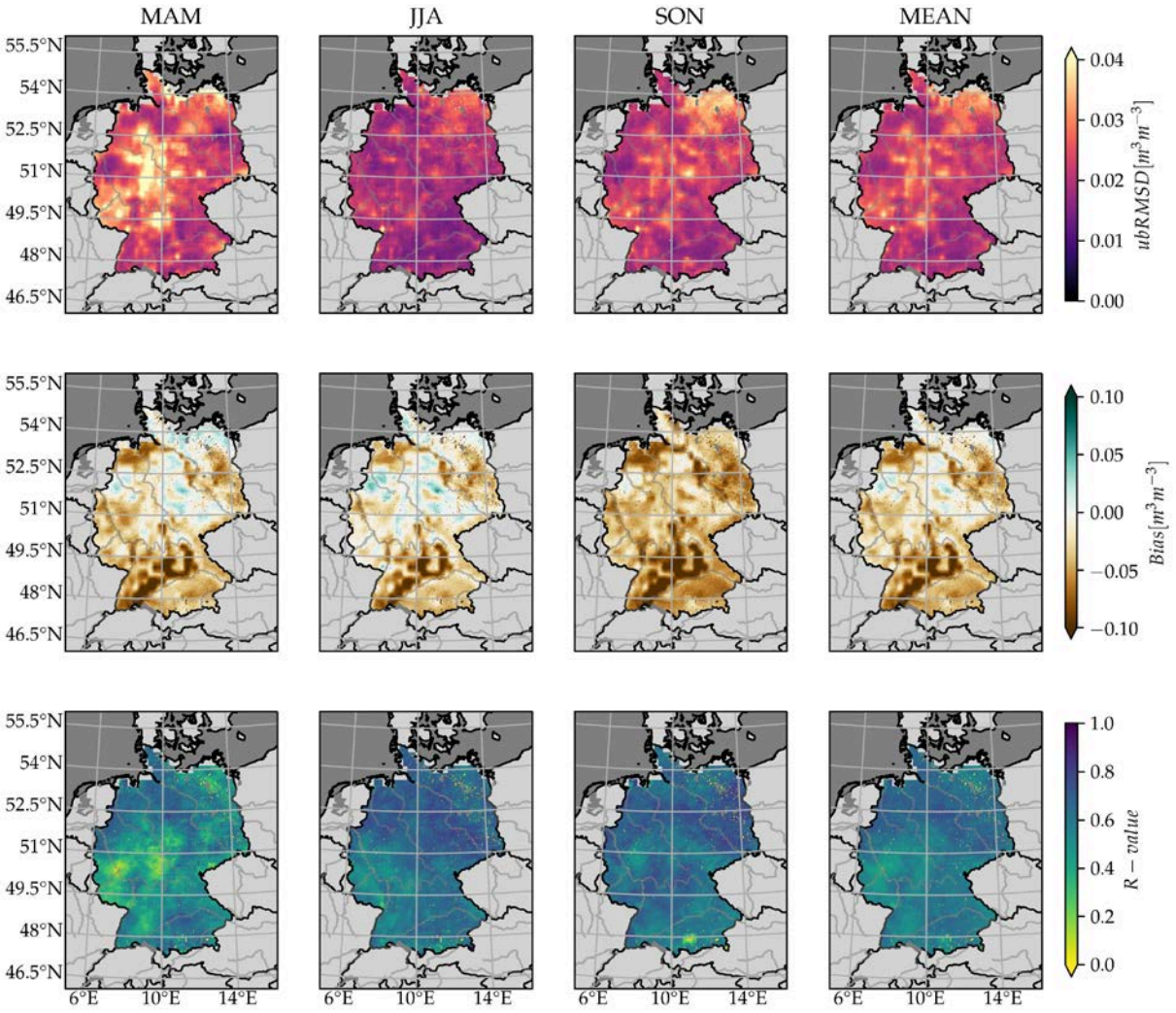


Abb 3: ubRMSD, Bias und Korrelationskoeffizient R zwischen RADOLAN API und ESA CCI SM für nach Monatszeiträumen MAM, JJA, SON und den Mittelwert daraus (Ramsauer et al. 2021).

4. Diskussion

Trotz des empirischen Ansatzes ist der vorgestellte, erweiterte Vorregenindex in der Lage, räumlich verteilte, realistische Bodenfeuchtedaten für Deutschland zu liefern. Die Erweiterung des Index mit den Verlustfunktionen, welche sich am Sättigungszustand des Bodens orientieren und die empirisch hergeleiteten, physikalischen Grenzen der Bodenwasserkapazität beachten, erlaubt es, die Prozesse der Bodenhydrologie gut abzubilden. Über das Einbeziehen von Bodeninformation und Temperatur kann auch ein räumlich differenzierte Bodenwasserdynamik dargestellt werden.

Vegetation hat über verschiedene Prozesse, wie z.B. Transpiration und Interzeption einen großen Einfluss auf die Bodenhydrologie. Trotzdem werden diese Faktoren nicht direkt oder nur sehr vereinfacht über die Temperatur im vorgestellten API Algorithmus beachtet. Daher muss auch die Gültigkeit des Ansatzes auf Grasland und weniger intensiv bewirtschaftete landwirtschaftliche Flächen beschränkt werden.

Eine verbesserte Abbildung der Saisonalität, wie sie von den lokal optimierten API Werten erreicht wird, ist in zukünftigen Arbeiten anzustreben.

5. Fazit

In dieser Studie wurden hochaufgelöste Bodenfeuchtedaten vorgestellt, welche hauptsächlich auf den RADOLAN RW Wetterradardaten des DWD, grundlegenden bodenphysikalischen Eigenschaften und Temperaturinformationen beruhen. Dieses Bodenfeuchteprodukt, basiert auf einem erweiterten Vorregenindex und liefert über Deutschland stündliche Feuchtewerte für den Oberboden. Über die Verwendung räumlich differenzierter Verlustfaktoren, können verschiedene Bodenwasserdynamiken abgebildet werden. Dabei erzielt der RADOLAN API geringere Fehlerwerte beim Vergleich zu Stationsmessdaten als das ESA CCI SM Produkt. Insbesondere die rapiden Feuchteanstiege werden aufgrund der zeitlich hochaufgelösten Eingangsdaten exakt getroffen.

Datenverfügbarkeit

Der Datensatz für die Jahre 2015-2020 ist frei verfügbar. Er kann als NetCDF-Datei unter https://zenodo.org/record/4588904 heruntergeladen werden (Ramsauer et al. (2021)).

Literatur

Bartels, H., 2004. Projekt RADOLAN. Routineverfahren zur Online-Aneichung der Radarniederschlagsdaten mit Hilfe von Automatischen Bodenniederschlagsstationen (Ombrometer). Deutscher Wetterdienst, Hydrometeorologie. Offenbach, Germany.

Hengl, T., de Jesus, J.M., Heuvelink, G.B.M., Gonzalez, M.R., Kilibarda, M., Blagotić, A., Shangguan, W., Wright, M.N., Geng, X., Bauer-Marschallinger, B., Guevara, M. A., Vargas, R., MacMillan, R. A., Batjes, N. H., Leenaars, J. G. B., Ribeiro, E., Wheeler, I., Mantel, S., Kempen, B., 2017. SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. PLoS ONE 12, 2.

Hersbach, H, de Rosnay, P, Bell, B, Schepers, D, Simmons, A, Soci, C, Abdalla, S, Alonso-Balmaseda, M, Balsamo, G, Bechtold, P, Berrisford, P, Bidlot, J-R, de Boisséson, E, Bonavita, M, Browne, P, Buizza, R, Dahlgren, P, Dee, D, Dragani, R, Diamantakis, M, Flemming, J, Forbes, R, Geer, AJ, Haiden, T, Hólm, E, Haimberger, L, Hogan, R, Horányi, A, Janiskova, M, Laloyaux, P, Lopez, P, Munoz-Sabater, J, Peubey, C, Radu, R, Richardson, D, Thépaut, J-N, Vitart, F, Yang, X, Zsótér, E, Zuo, H, 2018. Operational global reanalysis: Progress, future directions and synergies with NWP. In: ERA Report Series. ECMWF. Reading, UK.

Kohler, M.A., Linsley, R.K., 1951. Predicting the Runoff from Storm Rainfall. U.S. Department of Commerce, Weather Bureau. Washington, DC, USA.

Noilhan, J., Mahfouf, J.F., 1996. The ISBA land surface parameterisation scheme. Global and Planetary Change 13, 145–159.

Ramsauer, T., Weiß, T., Löw, A., Marzahn, P., 2021. RADOLAN_API: An Hourly Soil Moisture Data Set Based on Weather Radar, Soil Properties and Reanalysis Temperature Data, Remote Sensing 13.

Ramsauer, T., Weiß, T., Marzahn, P., 2021b. RADOLAN_API - A Soil Moisture Data Set derived from Weather Radar Data. V 1.0.0. Zenodo. https://zenodo.org/record/4588904.

Zacharias, S., Bogena, H., Samaniego, L., Mauder, M., Fuß, R., Pütz, T., Frenzel, M., Schwank, M., Baessler, C., Butterbach-Bahl, K., Bens, O., Borg, E., Brauer, A., Dietrich, P., Hajnsek, I., Helle, G., Kiese, R., Kunstmann, H., Klotz, S., Munch, J. C., Papen, H., Priesack, E., Schmid, H. P., Steinbrecher, R., Rosenbaum, U., Teutsch, G., Vereecken, H., 2011. A Network of Terrestrial Environmental Observatories in Germany. Vadose Zone Journal 10. 955–973.

Niederschlags-Abfluss-Modellierung des Kalkgrabens – Vergleich verschiedener Ansätze zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen für ein kleines Einzugsgebiet

Thomas Büche, Mareike Winkler, David Gampe

Zusammenfassung

Die Ermittlung von hydrologischen Planungsgrundlagen zum Hochwasserschutz auf kommunaler Ebene sind meist für kleine Einzugsgebiete erforderlich. Aufgrund der selten verfügbaren Pegelbeobachtungen werden diese in der Regel auf Basis einer Niederschlags-Abfluss-Modellierung unter Verwendung von Einheitsganglinien-Verfahren ermittelt. Aktuell existieren keine regionalen Entscheidungshilfen und Bewertungsgrundlagen dieser Verfahren. In diesem Beitrag werden die Simulationsergebnisse von Hochwasserabflüssen (HQ_{100}) für ein bepegeltes, kleines Einzugsgebiet in Südbayern (Kalkgraben) anhand einer Auswahl der in der Praxis üblichen Ansätze analysiert. Die Ergebnisse zeigen hohe Unsicherheiten in der Ermittlung des Scheitelabflusses (-80 bis +50%) und der Form des Wellenablaufes sowie des Eintretens der Abflussspitze. Diese Studie liefert Erkenntnisse über die Unsicherheiten der gängigen Verfahren und hebt den Bedarf nach weiterer Forschung in diesem Bereich hervor.

1. Einführung

In den vergangenen Jahrzehnten haben Hochwasserereignisse in ihrer Frequenz stark zugenommen (Bertola et al. 2020, Kaiser et al. 2021). In diesem Zusammenhang sind besonders kleinere Einzugsgebiete (< 25 km²) häufig von schweren Hochwasserereignissen betroffen (Kaiser et al. 2020). Extreme Niederschlagsereignisse führen speziell in solchen kleineren Einzugsgebieten wie Braunsbach (Bronstert et al. 2017, Ozturk et al. 2018) und Simbach (Hübl 2018) zu gravierenden Schäden durch rasch auftretende Sturzfluten.

Für einen wirkungsvollen Hochwasserschutz ist es daher unbedingt notwendig Maßnahmen zu ergreifen, die eine Reduktion des Scheitelpunktes des Hochwasserabflusses zu erzielen (Qin 2020). Im Rahmen der Planung von Maßnahmen zum Schutz vor Hochwasser ist die Abschätzung von Abflusswerten für bestimmte Jährlichkeiten von zentraler Bedeutung (Spreafico et al. 2003). Für Betrachtungen zum potentiellen Hochwasserrückhalt sind neben den Werten des Scheitelabflusses auch Abflussganglinien erforderlich. Zur Abschätzung der Hochwasserereignisse dienen verschiedene Modellierungsansätze unterschiedlicher Komplexität, beispielsweise mittels (flächenverteilter) hydrologischer Niederschlags-Abfluss-Modelle, sowie hydrodynamische Modelle (David & Schmalz 2020).

Vor allem auf kommunaler Planungsebene (beispielsweise für Gewässer III. Ordnung in Bayern, BayGT 2003) sind häufig kleine Einzugsgebiete (< 5 km², Nützmann & Moser, Hydrotec & Energielenker 2021) zu betrachteten, welche oftmals der Problematik fehlender Pegelmessungen (Bloeschl et al. 2013) unterliegen. Daher werden die erforderlichen hydrologischen Planungsgrundlagen in der Praxis häufig notgedrungen mittels einer Niederschlags-Abfluss-Modellierung unter der Verwendung einer Einheitsganglinie (EGL) ermittelt (Lutz 1984). Die der Modellierung zu Grunde liegenden verschiedenen Verfahren liefern jedoch teilweise sehr unterschiedliche Ergebnisse. In Bayern bzw. Deutschland existiert bislang keine standardisierte Herangehensweise für die Abschätzung von Hochwasserabflüssen für kleine Einzugsgebiete bzw. keine Entscheidungshilfe oder konkrete Bewertung der Anwendbarkeit der hierbei gängigen Verfahren in der Niederschlags-Abfluss-Modellierung.

Die langjährigen Pegelaufzeichnungen am Kalkgraben, ein Zufluss zum Starnberger See mit einem Einzugsgebiet von 1,2 km², bieten die seltene Möglichkeit die Ergebnisse der Abschätzung von Hochwasserabflüssen aus der Niederschlag-Abfluss-Modellierung mit Mess- und statistischen Daten zu vergleichen. Somit soll diese Fallstudie einen Beitrag dazu leisten, die Anwendbarkeit von verschiedenen gängigen Ansätzen für ein kleines, voralpines Einzugsgebiet zu analysieren und zu bewerten. Dabei sollen Ganglinien ermittelt werden, welche sowohl mit dem Scheitel den statistischen Wert eines 100-jährlichen Hochwasserabflusses (HQ_{100}) als auch den Wellenablauf eines abgelaufenen Ereignisses mit etwa der Jährlichkeit 100 bestmöglich abbilden.

2. Untersuchungsgebiet

Der Kalkraben liegt im Gebiet der Gemeinde Tutzing, ca. 35 km südlich von München (Abbildung 1a). Er mündet nach einer Fließlänge von 2,95 km in den Starnberger See und entwässert ein Einzugsgebiet von 1,22 km^2 (LfU 2022). Der Kalkgraben entspringt auf einer Höhe von 674,3 m ü. NN und überwindet bis zur Mündung eine Höhendifferenz von ca. 90 m (LDBV 2020, LfU 2022) bei einem mittleren Gefälle von 3 % (weitere Kenngrößen siehe Tabelle 3). Im oberen Teil des Einzugsgebietes sind die Gewässerläufe flach. In den mittleren Abschnitten sind der Kalkgraben und seine Zuflüsse tief in den Untergrund eingeschnitten. Im Ortsbereich ist der Gewässerlauf meist stark verbaut. Das Einzugsgebiet des Kalkgrabens ist Teil der Jungmoränenlandschaft des Alpenvorlandes, welches in der Würm-Kaltzeit geformt wurde. Geschiebemergel und -lehm bilden die Grundlage für kalkhaltige Braunerden, welche im Gebiet vorherrschend sind. Etwa ein Fünftel des Einzugsgebietes stellt bebaute und versiegelte Flächen dar (Abbildung 1b, Tabelle 2).

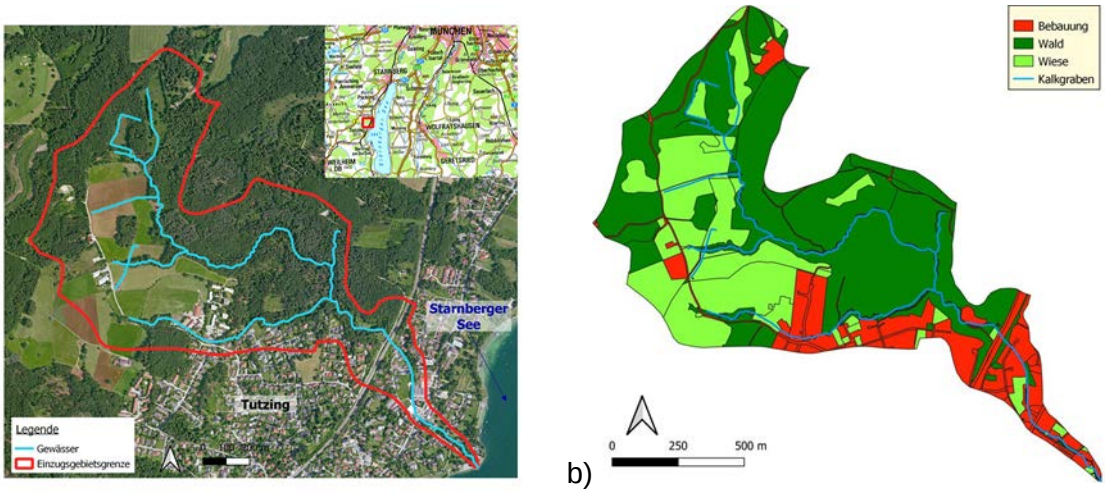


Abb 1.: Lage des Einzugsgebietes des Kalkgrabens (a) sowie Klassifikation der Landnutzungen in Bebauung, Wald und Wiese (b); Datenquellen: LFU 2016a, DBV 2021 & 2022a, b).

3. Methoden

3.1 Messdaten

Der Pegel “Tutzing” des Kalkgrabens liegt 210 m flussaufwärts von der Mündung in den Starnberger See auf einer Höhe von 588,5 m ü. NN. (LfU 2022). Messdaten zum Abfluss stehen durchgängig seit 01.11.1978 bis zu aktuellen Messwerten zur Verfügung (LfU 2022) und es

liegen statistische Abflusskenngrößen (HQ_T) vor. Der Scheitelabfluss des HQ_{100} liegt demnach bei 5,2 m³/s. Die Hauptwerte sind für den Zeitraum 1979-2012 ermittelt. Der mittlere Abfluss (MQ) wird mit 0,035 m³/s angegeben. Der HQ für den Pegel liegt bei 5,32 m³/s und wurde am 11.07.1989 gemessen. Dieses Ereignis wird in dieser Untersuchung als Referenzereignis verwendet (siehe blaue Ganglinie Abbildung 2). Nach dem initialen Anstieg des Abflusses wurde der Scheitel der Hochwasserwelle nach 1,25 h erreicht.

3.2 Eingangsdaten zur Niederschlags-Abfluss-Modellierung

Kennwerte und Informationen zum Einzugsgebiet als Eingangsdaten für die Niederschlags-Abfluss-Modellierung sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Das hydrologische Einzugsgebiet wurde dem Datensatz EZG25 1:25.000 (LfU 2016a) entnommen. Informationen zum Gelände wurden anhand des DGM1 (LDBV 2020) ermittelt. Die Landnutzung wurde vom Datensatz zur Tatsächlichen Nutzung (TN) abgeleitet (LDBV 2021).

Für die in dieser Untersuchung angewendeten Modellansätze zur Bestimmung des abflusswirksamen Niederschlags (siehe Kapitel 3.4), wie das Curve-Number-Verfahren oder dem Verfahren nach Lutz (1984), ist die Klassifikation des Bodens in Hydrologische Bodengruppen erforderlich. Die Standorte werden entsprechend ihres Versickerungsvermögens und Auftretens wasserstauender Horizonte in vier Gruppen (A - hohes Versickerungsvermögen bis D - geringes Versickerungsvermögen) eingeteilt (Seibert & Auerswald 2020). Für Deutschland steht bisher keine kein einheitlicher Datensatz zur Verfügung. In dieser Studie wird auf einen unveröffentlichten Datensatz zurückgegriffen (LfU 2019), welcher vom Bayerischen Landesamt für Umwelt zur Verfügung gestellt wurde. Darin ist für ganz Bayern die Hydrologische Bodengruppe auf Basis der Bodenart aus der Übersichtsbodenkarte 1:25.000 und der daraus abgeleiteten Korngrößenverteilung in diese vier Gruppen klassifiziert.

3.3 Eingabeparameter der Modellierung und angewendete Verfahren

Zur Abbildung des 100-jährlichen Hochwasserereignisses des Kalkgraben mittels Niederschlags-Abfluss-Modellierung wurden verschiedene Kombinationen von Verfahren zur Ermittlung des Abflussbeiwertes, Ganglinienverfahren, Niederschlagsverteilungen (NSV) und -dauerstufen D betrachtet. Unter der gängigen Annahme, dass ein Niederschlagsereignis mit dem Wiederkehrintervall (Jährlichkeit) T einen T-jährlichen Abfluss erzeugt (Seibert & Auerswald 2020) wurden Niederschlagshöhen T = 100 für 7 Dauerstufen betrachtet (Tabelle 1) und den KOSTRA-DWD-2010 Daten (Junghänel et al. 2017) Zelle S46-Z95 entnommen. Die Daten sind vom Deutschen Wetterdienst ermittelt. Die Grundlage ist der Zeitraum 1951 bis 2010 (Malitz & Ertel 2015). Es wurden vier zeitliche Verteilungen des Niederschlags entsprechend DVWK (1984) betrachtet: anfangs-, mitten, endbetonte Verteilung sowie Blockregen.

Als Anfangsverlust für das Untersuchungsgebiet wurde anhand der hydrologischen Bodengruppen und Landnutzung (Tabelle 2) der Wert von 2,16 mm berechnet. Der Basisabfluss entspricht mit 0,03 m³/s dem MQ (abgerundet).

Der zur Abschätzung der Hochwasserabflüsse erforderliche Abflussbeiwert Ψ wurde nach zwei Verfahren ermittelt: nach Lutz (1984) und dem Curve-Number-Verfahren des Soil Conservation Service (SCS, NRCS 2004, Williams et al. 2012, Tabelle 1). Für den Wert der Curve-Number (CN) wurde 82,5 ermittelt. Zur Ermittlung von Ψ nach Lutz ist die Angabe der

Basisabflussspende = 13 (l/s)/km², und weiterer Eichparameter (C1 = 0,2, C2 = 3,3, C3 = 2,0 und C4 = 0) erforderlich. C1, C3, und C4 entsprechen den von Lutz (1984) empfohlenen Standardwerten. Der C2-Wert spiegelt die Abhängigkeit der abflusswirksamen Eigenschaften des Einzugsgebietes von der Jahreszeit ab. Für den Kalkgraben kann ein ausgewogenes Verhältnis von Flächen jahreszeitlich variabler Nutzung und Bereichen mit eher gleichbleibenden Eigenschaften im Jahresverlauf angenommen werden. Ψ wurde für den Monat Juli ermittelt. Die Abflussbeiwerte nach dem CN-Verfahren liegen in etwa um den Faktor 2 höher als die nach dem Lutz-Verfahren ermittelten Werte. Der zeitliche Verlauf von Ψ wurde für alle Simulationen als konstant gesetzt.

Tab. 1: Betrachtete Niederschlagsdauern und die zugehörigen -höhen für das Wiederkehrintervall T = 100 (nach KOSTRA-DWD-2010) und die Abflussbeiwerte Ψ nach dem CN- und Lutz-Verfahren.

Niederschlag		Abflussbeiwert Ψ	
Dauer [h]	Höhe [mm]	CN	Lutz
0,5	54,0	0,36	0,18
0,75	65,9	0,42	0,21
1,0	75,5	0,47	0,23
1,5	79,4	0,48	0,23
2,0	82,4	0,50	0,24
3,0	86,9	0,51	0,25
4,0	90,3	0,52	0,25
0,5	54,0	0,36	0,18

Tab. 2: Anteile [%] der Hydrologischen Bodengruppen getrennt nach Landnutzung.

Landnutzung	Gesamt	Hydrologische Bodengruppen			
		A	B	C	D
Bebauung	18,3	0,0	1,3	3,5	13,5
Wald	53,7	0,0	0,0	33,4	20,3
Landwirtschaft	28,0	0,0	0,9	5,8	21,3

Zur Abschätzung des Hochwasserereignisses (Abflussganglinie) wurden das Dreiecksganglinienverfahren (LfU 2016b), und die Einheitsganglinienverfahren nach Soil Conservation Service (SCS, Caspary 1987, USDA 1986) und nach Lutz (1984) angewendet. Zusätzlich wurde noch das angepasste Verfahren Lutz „Südbayern“ angewendet (Ott 1997). Für das Dreiecksganglinienverfahren wurde anhand des Schätzverfahrens nach LfU (2016b) eine Anlaufzeit von 140 min ermittelt. Dabei wurde für den Ablauffaktor F der Wert 1,5 gewählt, welcher eine Mischung von Waldanteilen sowie Acker- und Wiesenflächen bei untergeordneter Bebauung repräsentiert (LfU 2016b). Für das EGL nach Lutz ist ein Gebietsfaktor P1 zu definieren. Für die Bestimmung wurde der Grad der Bebauung (18,2 %) im Einzugsgebiet herangezogen und es ergibt sich ein Wert von 0,232. Für das angepasste Verfahren Lutz „Südbayern“ ist P1 mit 0,189 festgelegt und zusätzlich ein Korrekturfaktor 0,556 angewendet (Ott 1997).

Tab. 3: Kennwerte des hydrologischen Einzugsgebietes des Kalkgrabens und Anwendung (Δ = Dreiecksganglinienverfahren, S = EGL-Verfahren nach SCS, L = EGL nach Lutz)

Parameter	Wert	Anwendung
Fläche	1,22 km²	
Höhendifferenz	91 m	Δ
Länge des Hauptgewässers	3,04 km	Δ, L, S
Länge des Gewässers zum Schwerpunkt des EZG	1.94 km	L
Mittleres Gefälle	3,06 %	S
Gewogenes Gefälle	3,39 %	L

Zur Niederschlags-Abfluss-Modellierung zur bestmöglichen Abbildung des gemessenen Hochwasserereignisses von Juli 1989 wurden demnach insgesamt 224 Parameterkombinationen simuliert. Es wurde im ersten Schritt die korrekte Simulation des Spitzenabflusses und im zweiten Schritt die Form der Hochwasserwelle analysiert.

4. Ergebnisse

Für die untersuchten Parameterkombinationen werden Scheitelabflüsse von 1,12 - 7,78 m³/s simuliert. Die entspricht einer Abweichung vom HQ_{100} von ca. +50 % bzw. -80 %. Eine Abweichung des Scheitelabflusses von unter 10 % wird lediglich mit 10 Kombinationen erreicht. Alle diese Ganglinien sind mit einem Abflussbeiwert ermittelt, welcher mit den CN-Verfahren (SCS) bestimmt wurde. Das Ergebnis mit der geringsten Abweichung mit 5,18 m³/s liefert die Kombination aus der Anwendung des EGL nach Lutz, Ermittlung des Abflussbeiwertes nach SCS (CN-Verfahren), einer Niederschlagsdauerstufe von D = 45 min sowie Blockregen. Die Ergebnisse für diese Kombination (EGL: Lutz, Ψ: SCS, 45 min) ergibt als einzige Kombination für alle vier NSV eine Abweichung von unter 10 %. Gleichzeitig liegen der Zeitpunkt des Scheitels dieser vier Ganglinien innerhalb von 25 min. Die Abflussspitze der mittenbetonten Verteilung ist für 1,25 h nach Beginn des Regens simuliert, welches dem gemessenen Ereignis entspricht. Die Form des Abfalls der Ganglinie hat ebenfalls einen ähnlichen Verlauf. Demnach wird die Ganglinie dieser Parameterkombination (EGL: Lutz, Ψ: SCS, 45 min, NSV: mittenbetont) als beste Näherung angesehen und ist in Abbildung 2 (rot) der gemessenen Ganglinie vom Ereignis im Juli 1989 (blau) und gegenübergestellt.

Abbildung 2 zeigt zudem ebenfalls die Ganglinien für die Variation des EGL-Verfahrens bei sonst gleichbleibender Kombination (NSV: mittenbetont, Ψ: SCS, D: 45 min). Demnach unterschätzt die Ermittlung anhand des Dreiecksganglinienverfahrens stark und bildet einen Eintritt des Scheitels um ca. 75 min später im Vergleich zum abgelaufenen Ereignis ab. Dies ist auf die hohe Diskrepanz in der Ermittlung der Anlaufzeit zurückzuführen. Bei einer Anpassung der Anlaufzeit auf die Niederschlagsdauer von 45 min ergibt eine sehr hohe Überschätzung des Scheitelabflusses um ca. 64 %. Das EGL-Verfahren Lutz-Südbayern unterschätzt ebenfalls im maximalen Abfluss für D = 45 min und bildet grundsätzlich zu flache Ganglinien aus. Der höchste Scheitelabfluss (4,77 m³/s) wird für D = 2 h simuliert. Dann besitzt die Ganglinie mit 50500 m³ im Vergleich zum gemessenen Ereignis (35500 m³ bei einer Ereignisdauer von insg. 6 h) ein um ca. 42 % überschätztes Volumen. Das EGL-Verfahren nach SCS bildet die Form des Wellenverlaufs gut wieder. Im Vergleich zum Verfahren nach Lutz wird der Scheitelabfluss

jedoch überschätzt. Diese Erkenntnisse zu den EGL-Verfahren sind übertragbar auf die Simulation am Kalkgraben mit andere Niederschlagsdauern und -verteilungen.

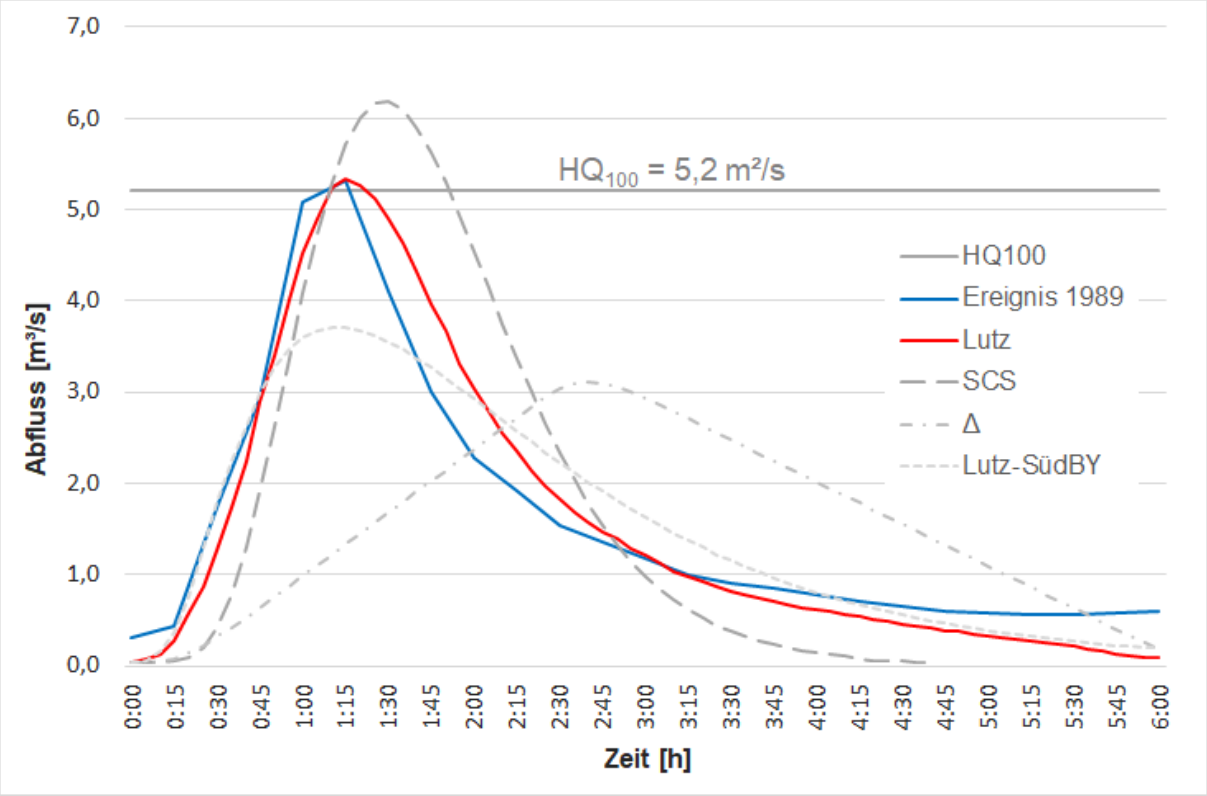


Abb. 2: Ganglinien des gemessenen Ereignisses (Juli 1989) und der simulierten Wellenabläufe für ein HQ100 für ein mittenbetontes Niederschlagsereignis, Dauerstufe = 45 min und Ψ ermittelt nach SCS und variierendem EGL-Verfahren.

5. Diskussion und Erkenntnisse

Die sehr großen Unterschiede in den simulierten Scheitelabflüssen im Vergleich zum gemessenen Ereignis und zum statistischen HQ_{100}-Wert verdeutlichen die Wichtigkeit der Betrachtung der unterschiedlichen Verfahren. Für den Kalkgraben führt die Kombination von Ermittlung des Abflussbeiwertes und EGL-Verfahren nach SCS zu deutlichen Überschätzungen im Scheitelabfluss von 15 % bis 50 %. Die flachen Ganglinien des EGL-Verfahrens „Lutz-Südbayern“ unterschätzen im Untersuchungsgebiet und erscheinen generell für kleine Einzugsgebiete ungeeignet, da diese meist schnell reagieren und keine großen Retentionszeiten zu erwarten sind (Nützmann & Moser 2016).

Naturgemäß spielt der Abflussbeiwert Ψ bei der Simulation der Ganglinie eine entscheide Rolle (Stahl & Casper 2017). Aufgrund der im Vergleich zum CN-Verfahren deutlich geringen Werte für Ψ werden auf dieser Grundlage keine Hochwasserscheitelabflüsse zu gering simuliert. Dennoch ist das Verfahren nach Lutz nicht pauschal abzulehnen. Denn es ist zu beachten, dass der Eichparameter C1 für alle Simulationen unverändert mit 0,02 angesetzt wurde. Nach Seibert & Auerswald (2020) ist für C1 eine hohe Sensitivität anzunehmen. Nach LfU (2016b) variiert C1 zwischen 0,05 (südliches Bayern) und 0,1 (Alpenraum).

Die Ermittlung der Anstiegszeit bis zum Eintritt des Scheitelabflusses anhand des Schätzverfahrens nach LfU (2016b) ist für den Kalkgraben unzureichend. Demzufolge kann das abgelaufene Hochwasserereignis anhand des Dreiecksganglinienverfahren nicht hinreichend abgebildet werden. Jedoch ist bei unbekannter Anlaufzeit die Anwendung des Schätzverfahrens (LfU 2016b) gängige Praxis, um die maßgebende Niederschlagsdauer für ein Hochwasserereignis zu ermitteln oder zumindest einen Anhaltspunkt zu erhalten. Die Ergebnisse dieser Untersuchung lassen folgern, dass für kleine Einzugsgebiete diese Methode mindestens durch die Anwendung einer weiteren Methode überprüft werden sollte, denn eine Fehleinschätzung hier kann zu hohen Über- oder Unterschätzungen bei Hochwasserscheiteln und die angesetzten Volumina führen.
Bezüglich der NSV kann auf Basis der Simulationen für den Kalkgraben keine klare Priorisierung erfolgen. Es ist festzuhalten, dass für größere Dauerstufen höhere Abweichungen im Scheitelabfluss zu erwarten sind und demnach bestenfalls mehrere NSV betrachtet werden sollten.
Die Übertragbarkeit der Ergebnisse dieser Studie auf andere kleine unbeobachtete Einzugsgebiete ist aufgrund der Fallstudie für nur ein Einzugsgebiet limitiert. Aufgrund fehlender vergleichbarer Untersuchungen können die Erkenntnisse der Studie als wichtige Anhaltspunkte für Einzugsgebiete mit ähnlicher Größe und Naturraum angesehen werden. Da das Hochwassergeschehen im Einzugsgebiet des Kalkgrabens insbesondere auf das Fließgewässer zurückzuführen ist, sind die Ergebnisse auf sehr kleine Einzugsgebiete mit Größen deutlich unter 1 km² schlecht übertragbar. In diesen Einzugsgebieten existieren meist keine Gewässerläufe und die Hochwassergefahr geht vor allem von wild abfließendem Oberflächenwasser aus, wenngleich für diese Fragestellung ebenfalls die gleichen Ansätze zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen zur Anwendung kommen.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Untersuchung liefert Erkenntnisse für eine Auswahl an in der Praxis etablierten Ansätzen zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen mittels Niederschlags-Abfluss-Modellierung. Der Vergleich von simulierten Ganglinien mit gemessenen Daten erbrachte eine hohe Variabilität für die untersuchten Parameterkombinationen. Unter der Verwendung des EGL-Verfahrens nach Lutz und die Ermittlung des Abflussbeiwertes nach SCS (CN-Verfahren) konnte sowohl der Abflussscheitel eines etwa 100-jährlichen Ereignisses als auch die Form der Abflussganglinie zufriedenstellend nachgebildet werden. Die Ergebnisse können insbesondere für die Anwendung für unbeobachtete kleine Einzugsgebiete als wichtige Orientierung dienen.
Als fundierte Grundlage für eine Entscheidungshilfe in dieser Fragestellung für kleine Einzugsgebiete, wäre eine Untersuchung mit einer möglichst hohen Anzahl von beobachteten Einzugsgebieten gewinnbringend. Dies könnte auch eine Sensitivitätsanalyse für Eingabeparameter beinhalten, welche insbesondere für den Eichparameter C1 im Lutz-Verfahren von hohem Interesse wäre.
Grundsätzlich besteht Forschungsbedarf hinsichtlich der für die Bemessung anzuwenden Methoden in der Niederschlags-Abfluss-Modellierung in kleinen Einzugsgebieten. Die etablierten und teilweise in diesem Beitrag behandelten Ansätze (z. B. nach DVWK (1984), nach Lutz

(1984) oder das SCS (USDA 1985)) sind schon älter. Bemühungen diese weiterzuentwickeln sind ebenfalls relativ alt (Stahl & Casper 2017) und berücksichtigen nicht die stark verbesserte Grundlage an digitalen Geodaten und der seitdem enorm entwickelten Möglichkeiten in der Geodatenverarbeitung. Eine Möglichkeit wäre die Adaption der Hochwasserabschätzung nach Schaffner (2007). Es besteht zudem weiterer Forschungsbedarf bei der Ermittlung von Hochwasserabflüssen aus wild abfließendem Oberflächenwasser (pluviale Sturzfluten), für welche bislang die gleichen Verfahren und Ansätze zur Anwendung kommen. In räumlich begrenzten Gebieten könnte hier die Simulation mit hydrodynamischen Modellen (Humer et al. 2015) geeignet sein, beispielsweise mit einer Kopplung mit von hydrologischen Ansätzen (Broich et al. 2018).

Literatur

BayGT, Bayerischer Gemeindetag, 2003. Praxisratgeber Hochwasserschutz für Kommunen. München.

Bertola, M., Viglione, A., Lun, D., Hall, J., & Blöschl, G., 2020. Flood trends in Europe: are changes in small and big floods different? Hydrology and Earth System Sciences, 24(4), 1805-1822.

Bloeschl, G., M. Sivapalan, T. Wagener, A. Viglione, and H. H. G. Savenije (Eds.), 2013. Runoff Prediction in Ungauged Basins: Synthesis Across Processes, Places and Scales, Cambridge Univ. Press, Cambridge, U. K.

Broich, K., Kaiser, M., Lin, Q., Mitterer, J., Nguyen, H., Pflugbeil, T., von Trentini, F., Willkofer, F., Disse, M., Ludwig, R., 2018. Das Projekt HiOS – Erstellung einer Hinweiskarte für Ober- flächenabfluss und Sturzfluten für bayerische Gemeinden. In: Disse, M., Kaiser, M. (Hg.), Starkregen und Sturzfluten – Erfassen, Erforschen, Evaluieren; Beiträge zum Seminar am 6. Juni 2018, Nummer 40.18 in Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 27–40.

Bronstert, A., Agarwal, A., Boessenkool, B., Fischer, M., Heistermann, M., Köhn-Reich, L., ... & Wendi, D., 2017. Die Sturzflut von Braunsbach am 29. Mai 2016–Entstehung, Ablauf und Schäden eines „Jahrhundertereignisses “. Teil 1: Meteorologische und hydrologische Analyse. The Braunsbach Flashflood of Mai 29th, 2016–Origin, Pathways and Impacts of an Extreme Hydro-Meteorological Event. Part 1: Meteorological and Hydrological Analysis. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 61, 150-162.

Caspary, H.J., 1987. Analytische Lösung für die regionalisierte Einheitsganglinie des U.S. Soil Conservation Service. Wasser & Boden 39, 623–626.

David, A., & Schmalz, B., 2020. Flood hazard analysis in small catchments: Comparison of hydrological and hydrodynamic approaches by the use of direct rainfall. Journal of Flood Risk Management, 13(4), e12639.

DVWK, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, 1984. Arbeitsanleitung zur Anwendung von Niederschlag-Abfluß-Modellen in kleinen Einzugsgebieten. Teil II: Synthese. Regeln zur Wasserwirtschaft 113: Paul Parey, Hamburg.

Hübl, J., 2018. Hochwasser Simbach 2016: Dokumentation und Analyse. In Vorsorgender und nachsorgender Hochwasserschutz. Springer Vieweg, Wiesbaden, pp. 210-216.

Humer, G., Reithofer, A., Klar, R., Achleitner, S., 2015. Erweiterung eines 2D-Strömungsmodelles zur Berechnung von Sturzfluten. Korrespondenz Wasserwirtschaft, 164-171

Hydrotec, Energielenker, 2021. Projektteilbericht Klimaschutzteilkonzept zur Anpassung an den Klimawandel im Rheinisch-Bergischen Kreis – Teilbericht Starkregen.

Junghänel, T., Ertel, H., & Deutschländer, T., 2017. KOSTRA-DWD-2010R Deutscher Wetterdienst: Bericht zur Revision der Koordinierten Starkregenregionalisierung und-Auswertung des Deutschen Wetterdienstes in der Version 2010. Offenbach am Main.

Kaiser, M., Borga, M., & Disse, M., 2020. Occurrence and characteristics of flash floods in Bavaria (Germany). In Climate Change, Hazards and Adaptation Options. Springer, Cham, pp. 293-310.

Kaiser, M., Günnemann, S., & Disse, M., 2021. Spatiotemporal analysis of heavy rain-induced flood occurrences in Germany using a novel event database approach. Journal of Hydrology, 595, 125985.

LDBV, Bay. Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung, 2020. Digitales Geländemodell DGM1. www.geodaten.bayern.de

LDBV, Bay. Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung, 2021. Tatsächliche Nutzung. www.geodaten.bayern.de

LDBV, Bay. Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung, 2022a. Digitales Orthophoto DOP80 (WMS). www.geodaten.bayern.deLDBV, Bay. Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung (2022b): Digitale Topographische Karte 1:500.000 (WMS). www.geodaten.bayern.de

LfU, Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2016a. Digitales Gewässerverzeichnis Bayern, Veröffentlichung Einzugsgebiete 1:25000, Version 2016.

LfU, Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2016b. Loseblattsammlung Hydrologische Planungsgrundlagen.

LfU, Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2019. Karte Hydrologische Bodengruppe. Unveröffentlichter Geodatensatz auf Basis der Übersichtsbodenkarten 1.25.000.

LfU, Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2022. Gewässerkundlicher Dienst Bayern. https://www.gkd.bayern.de/de/. Abgerufen am 24.05.2022.

Lutz, W., 1984. Berechnung von Hochwasserabflüssen unter Anwendung von Gebietskenngrößen. Mitteilungen Institut f. Hydrologie und Wasserwirtschaft 24, Karlsruhe.

Malitz, G., Ertel, H., 2015. KOSTRA-DWD-2010. Starkniederschlagshöhen für Deutschland (Bezugszeitraum 1951 bis 2010), Abschlussbericht, Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main.

Natural Resources Conservation Service, 2009. Hydrologic soil groups. In: National Engineering Handbook. Part 630 Hydrology, chapter 7. US. Department of Agriculture, Washington.

NRCS, Natural Resources Conservation Service, 2004. Estimation of direct runoff from storm rainfall. In: National Engineering Handbook. Part 630 Hydrology, chapter 10. US Department of Agriculture, Washington

Nützmann, G., & Moser, H., 2016. Elemente einer analytischen Hydrologie, Wiesbaden.

Ott, M., 1997. Untersuchungen zur Ermittlung regional gültiger Hochwasserabflüsse am Beispiel des südbayerischen Donauraums. Schriftenreihe des FG Wasserbau und Wasserwirtschaft, Band 5, Uni Kaiserslautern.

Ozturk, U., Wendi, D., Crisologo, I., Riemer, A., Agarwal, A., Vogel, K., et al. & Korup, O., 2018. Rare flash floods and debris flows in southern Germany. Science of the total environment, 626, 941-952.

Qin, Y., 2020. Urban flooding mitigation techniques: a systematic review and future studies. Water, 12(12), 3579.

Schaffner F., 2007. Hochwasserabschätzung in Wildbacheinzugsgebieten auf der Grundlage von Einzugsgebietskenngrössen. Publikation Gewässerkunde Nr. 393. Diplomarbeit am Geographischen Institut der Universität Bern.

Seibert, S. P., Auerswald, K., 2020. Hochwasserminderung im ländlichen Raum: Ein Handbuch zur quantitativen Planung, Berlin.

Spreafico, L., Weingartner, R., Barben, M., Ryser, A., 2003. Hochwasserabschätzung in schweizerischen Einzugsgebieten - Praxishilfe. Berichte des BEG, Serie Wasser Nr.4, Bern.

Stahl, N., Casper, M., 2017. Eine neue ereignisbasierte Variante zur Ableitung von synthetischen Niederschlagsverteilungen zur Generierung von Hochwasserganglinien mit dem Niederschlag-Abfluss-Modell LARSIM am Beispiel des Isareinzugsgebietes. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 61, 93-119.

USDA, U.S. Department of Agriculture, 1985. National engineering handbook, Section 4 - Hydrology. Washington DC.

Williams, J.R., Kannan, N., Wang, X., Santhi, C., 2012. Evolution of the SCS runoff curve number method and its application to continuous runoff simulation. Journal of Hydrologic Engineering 17, 1221–1229.

Transport organischer Spurenstoffe in der Elbe beim Niedrigwasser 2019

Gerd Hübner, Daniel Schwandt, Michael Schlüsener, Arne Wick

Zusammenfassung

Bezogen auf die Trockenperiode im Sommer / Herbst 2019 wurde die Fracht von sieben Arzneistoffen und des Korrosionsschutzmittels Benzotriazol in der Elbe von Valy (CZ) bis Geesthacht (D) bilanziert. Die Datengrundlage lieferten Messprogramme in Tschechien und Deutschland. Die Fracht der Spurenstoffe im Elbe-Längsverlauf spiegelte die Zunahme der Einwohnerzahl mit wachsendem Einzugsgebiet nur bedingt wider. Bei einzelnen Stoffen nahm die Fracht zwischen Hřensko / Schmilka und Dresden ab, bei den meisten auch zwischen Schnackenburg und Geesthacht. Die Zuflüsse von Moldau, Mulde und Saale führten zu einem deutlichen Frachtanstieg, während ein solcher Einfluss der Havel teilweise nicht zu erkennen war. Gegenüber der Jahresspannweite war die Niedrigwasserfracht fast aller Spurenstoffe relativ gering, was auf höhere Transformationsraten unter sommerlichen Niedrigwasserbedingungen hindeutet.

1. Einführung

Bei Niedrigwasser (NW) werden vorwiegend gelöst transportierte anthropogene organische Spurenstoffe, die in Kläranlagen nur in geringem Maß eliminiert werden, im Gewässer in erhöhter Konzentration gemessen. Entsprechende Ergebnisse für die Elbe beim NW 2019 finden sich beispielsweise in Hübner & Schwandt (2021). Wie verhält es sich jedoch mit der vom Fluss transportierten Fracht dieser Stoffe? Bleibt diese je Messstelle konstant und nimmt flussabwärts einwohnerproportional zu oder zeigen sich (NW-)spezifische Effekte? Am Beispiel des Elbe-NWs im Sommer und Herbst 2019, das zwar kürzer, aber ähnlich extrem ausgeprägt war wie im Jahr 2018, wird dieser Frage anhand von Arzneistoffen und eines Korrosionsschutzmittels nachgegangen.

2. Untersuchungsgebiet, Methoden und Datengrundlagen

Gemäß Hübner & Schwandt (2021) wurde der NW-Zeitraum vom 15.7. bis zum 30.9.2019 definiert. In dieser Phase erfolgten an jeweils übereinstimmenden Terminen insgesamt sechs Stichprobenahmen des Elbewassers an fünf Messstellen in Tschechien (Valy, Lysá nad Labem, Obříství, Děčín und Hřensko; Monitoring durch Povodí Labe) und zwei Messstellen in Deutschland (Schmilka und Schnackenburg; Landesmonitoring Sachsen bzw. Niedersachsen). Die eng benachbarten Messstellen Hřensko und Schmilka wurden als eine Messstelle betrachtet und gemeinsam ausgewertet. Ergänzend wurden auf deutscher Seite durch die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) an den Probenahmetagen gewonnene Tagesmischproben der Elbe aus den Radiologischen Messstationen in Dresden, Wittenberg, Tangermünde und Geesthacht analysiert, wobei aus Wittenberg nur vier Proben zur Untersuchung vorlagen. Konzentrationen unter der Bestimmungsgrenze wurden mit der Hälfte dieses Wertes zur Frachtberechnung herangezogen. Eine Übersicht über die Lage der Messstellen und ihrer Bezugspegel gibt Abbildung 1.

Betrachtet wurden sieben Arzneistoffe – drei Antikonsulviva (Carbamazepin, Gabapentin und Primidon), zwei Schmerzmittel (Diclofenac, Tramadol), ein Betablocker (Metoprolol) sowie ein Antibiotikum (Sulfamethoxazol) – und das u. a. in Geschirrspülmitteln und Entkalkern enthaltene Korrosionsschutzmittel Benzotriazol. Alle diese Spurenstoffe gelangen typischerweise über den Ablauf kommunaler Kläranlagen ins Gewässer. An der Messstelle Schnackenburg

wurden Primidon, Tramadol und Metoprolol nicht untersucht, Gabapentin und Benzotriazol nur monatlich.
Zur Frachtberechnung wurden Tagesmittelwerte des Durchflusses an den Bezugspegeln der Messstellen verwendet, die durch Povodí Labe bzw. von der WSV erhoben und von der BfG bereitgestellt wurden (Stand: 2.12.2020 bzw. 10.5.2021). Die Daten der Einwohnerzahlen im Einzugsgebiet stammen aus Eurostat (2021). Die Spannweite der für den NW-Zeitraum ermittelten Tagesfrachten an den einzelnen Probestellen wurde – soweit Daten vorhanden waren – zur Spannweite der entsprechend berechneten Tagesfrachten an allen Messtagen des Jahres 2019 in Beziehung gesetzt. Alle verwendeten chemischen Messwerte sind in Povodí Labe (2020), LfULG (2022), NLWKN (2022) und BfG (2022) enthalten.

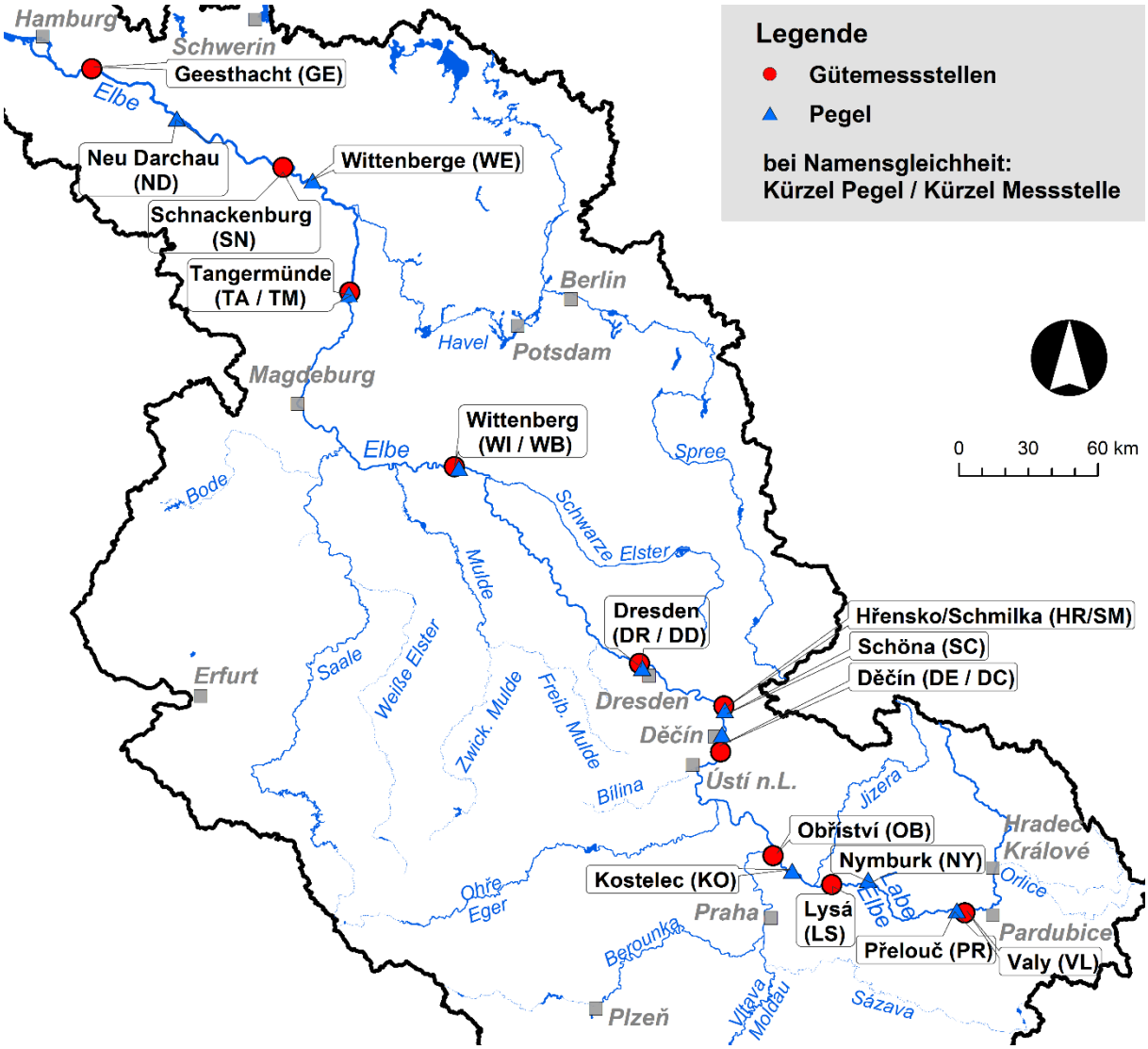


Abb. 1: Flussgebietseinheit Elbe (Ausschnitt) mit Gütemessstellen, Bezugspegeln und den hier verwendeten Abkürzungen.

3. Ergebnisse

3.1 Durchflussverhältnisse

Der Durchfluss der Elbe schwankte an den sechs NW-Beprobungstagen nur in engen Grenzen und war durchweg sehr niedrig (Abbildung 2). So betrug z. B. der Durchflussmittelwert der Beprobungstage am Pegel Wittenberg lediglich 103 m³/s, gegenüber einem dortigen langjährigen mittleren NW-Durchfluss (MNQ 1890 – 2020) von 130 m³/s. Je nach Flussabschnitt wurde meist am 2.9.2019, teilweise auch schon im August das Minimum der bei den Beprobungen aufgetretenen Durchflüsse erreicht.

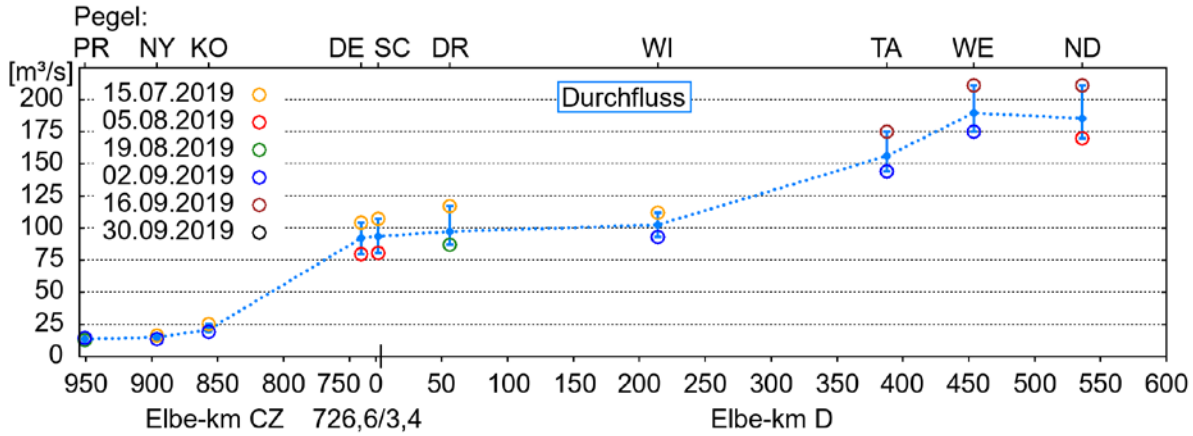


Abb. 2: Durchfluss (Spannweite und Mittelwert) an den Bezugspegeln von Gütemessstellen der Elbe an den NW-Beprobungstagen (ausgeschriebene Pegelnamen in Abbildung 1).

3.2 Frachtbilanzierung

Je nach Spurenstoff und Messstelle ergaben sich im NW-Zeitraum Tagesfrachten auf unterschiedlichem Niveau (Abbildungen 3a / 3b). Die geringsten Frachten wurden für Diclofenac (Minimum: 3,1 g/d bei Valy; Maximum: 816 g/d bei Tangermünde) und Metoprolol ermittelt (Minimum: 11 g/d bei Obříství; Maximum: 710 g/d bei Tangermünde), die höchsten für Benzotriazol (Minimum: 500 g/d bei Valy, Maximum: 24650 g/d bei Schnackenburg). Der Arzneistoff mit den höchsten Frachten war Gabapentin (bis rund 5000 g/d bei Tangermünde und Schnackenburg).

Wie die Abbildungen 3a / 3b ebenfalls verdeutlichen, spiegelte die Frachtentwicklung der Spurenstoffe in der Elbe die Einwohnerzahl des Einzugsgebiets im Elbelängsverlauf nur bedingt wider. Beispielsweise nahm die ermittelte Fracht von Gabapentin, Diclofenac und Metoprolol zwischen Hřensko / Schmilka und Dresden deutlich ab. Die Zuflüsse von Moldau sowie Mulde und Saale führten in allen Fällen zu einem Frachtanstieg, der gemäß der damit verbundenen erheblichen Erhöhung der Einwohnerzahl im Einzugsgebiet auch in der Regel sehr deutlich ausgeprägt war. Für Metoprolol zeigte sich zwischen Wittenberg und Tangermünde nur eine geringe Frachtzunahme.

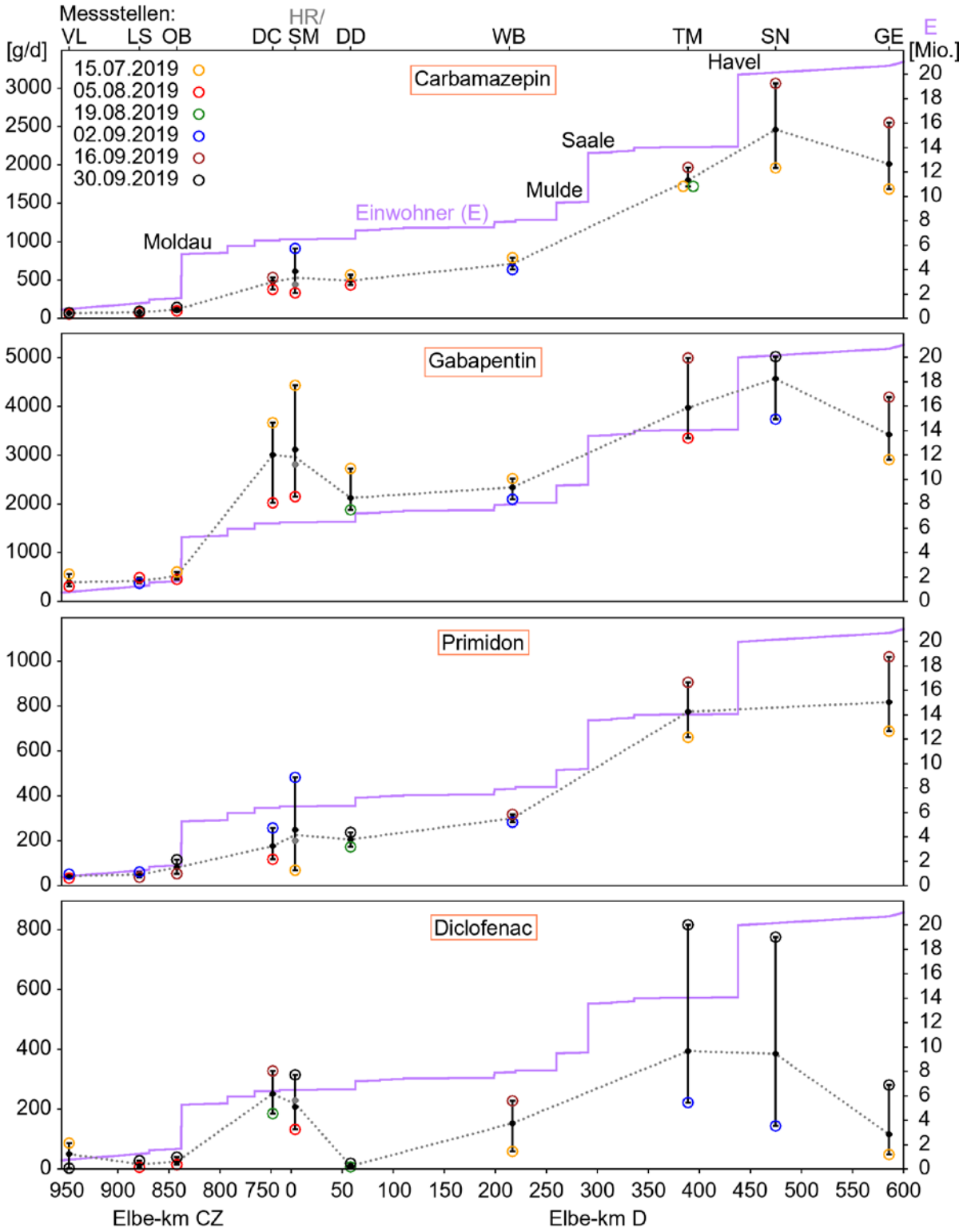


Abb. 3a: Fracht organischer Spurenstoffe (Spannweite und Mittelwert) an Gütemessstellen der Elbe an den NW-Beprobungstagen im Vergleich zur Einwohnerzahl im Einzugsgebiet (ausgeschriebene Messstellennamen in Abbildung 1; Frachtmittelwert nach Messungen bei Hřensko: grauer Punkt, bei Schmilka: schwarzer Punkt; Fortsetzung in Abbildung 3b).

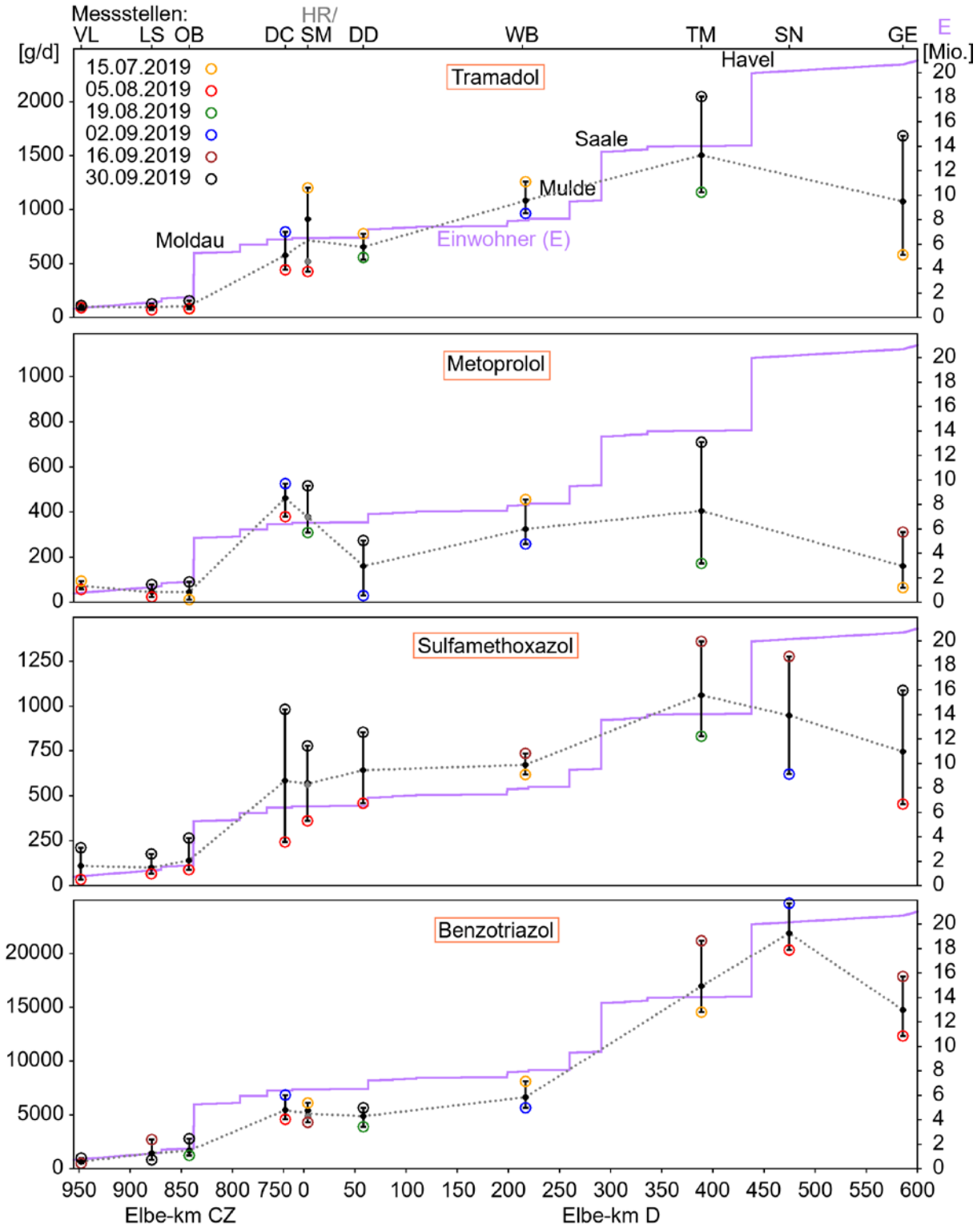


Abb. 3b: Fracht organischer Spurenstoffe (Spannweite und Mittelwert) an Gütemessstellen der Elbe an den NW-Beprobungstagen im Vergleich zur Einwohnerzahl im Einzugsgebiet (ausgeschriebene Messstellennamen in Abbildung 1; Frachtmittelwert nach Messungen bei Hřensko: grauer Punkt, bei Schmilka: schwarzer Punkt; Fortsetzung von Abbildung 3a).

In dem Abschnitt der Elbe zwischen Tangermünde und Schnackenburg, dem die Havel zufließt, war für Carbamazepin, Gabapentin und Benzotriazol ein kräftiger Frachtanstieg zu verzeichnen, während die Fracht bei Diclofenac stagnierte und bei Sulfamethoxazol sogar abnahm. Im weiteren Flussverlauf bis zum Wehr Geesthacht reduzierte sich die Fracht bei allen Stoffen, für die Messwerte der Elbe in Schnackenburg vorlagen. Mit Ausnahme von Carbamazepin und Primidon war die für Geesthacht ermittelte Fracht geringer als in Tangermünde.
Wie Abbildung 4 zeigt, erreichte die Spannweite der Tagesfrachten während des NWs bei Gabapentin und Diclofenac maximal die unteren 10 – 20 % der Tagesfrachtspannweite des Jahres, bei Tramadol und Metoprolol maximal 30 – 40 % und bei Carbamazepin maximal 50 %. Dagegen bewegten sich die Tagesfrachten von Primidon während des NWs überwiegend in der oberen Hälfte der Jahresspannweite, bei Hřensko / Schmilka wurde für den 2.9.2019 sogar die höchste Primidon-Tagesfracht im Jahr 2019 berechnet. Am 2.7.2019, also noch vor dem hier definierten NW-Zeitraum, waren an den Messstellen mit ganzjährigen Primidon-Messwerten (Valy bis Hřensko / Schmilka) allerdings die niedrigsten Primidon-Tagesfrachten des Jahres zu verzeichnen.

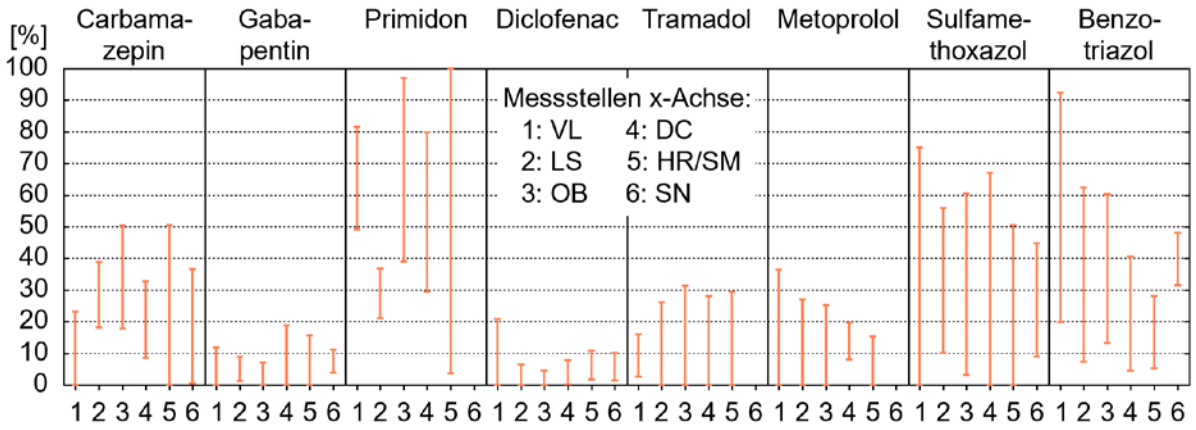


Abb. 4: Spannweite der Tagesfrachten organischer Spurenstoffe in der Elbe beim NW in Relation zur Spannweite der Tagesfrachten im gesamten Jahr 2019 (0 – 100 %); ausgeschriebene Messstellennamen in Abbildung 1.

4. Diskussion

Es ist grundsätzlich zu bedenken, dass die dargestellten Frachten nicht fließzeitkonform ermittelt wurden, so dass – unter Einbezug weiterer Unsicherheiten der Frachtberechnung (Analytik, Durchflussmessung, inhomogene Verteilung im Fließquerschnitt) – gewisse Unterschiede zum tatsächlichen Frachtverlauf anzunehmen sind. Dennoch geben die Ergebnisse deutliche Hinweise darauf, dass fast alle der hier untersuchten Spurenstoffe während des NWs einer verstärkten Transformation in Kläranlage und / oder Gewässer unterlagen. Als Gründe kommen längere Verweilzeiten aufgrund geringerer Fließgeschwindigkeit, stärkere Lichtexposition sowie durch höhere Wassertemperaturen beschleunigte chemisch-physikalische und insbesondere biochemische Umsetzungsprozesse in Frage. Ferner ist zu berücksichtigen, dass in Trockenperioden in der Regel kein ungereinigtes Abwasser durch Mischwasserabschläge ins Gewässer gelangt.

Eine relativ hohe Elimination von Arzneistoffen im Flusslauf bei sonnigem Trockenwetter wurde auch von Kunkel & Radke (2012) beschrieben, wobei Diclofenac und Metoprolol zu weit größerem Anteil transformiert wurden als Sulfamethoxazol. Bei Diclofenac stellte unter anderem die direkte Photolyse einen relevanten Transformationsprozess dar.

Metoprolol und Gabapentin können insbesondere im hyporheischen Interstitial durch biologische Prozesse transformiert werden (Schaper et al., 2018; Rutere et al., 2021), während der Phototransformation eine untergeordnete Bedeutung zukommt (Rühmland et al., 2015). Tramadol kann ebenfalls einer Transformation im Interstitial unterliegen (Schaper et al., 2019) und zusätzlich auch durch indirekte Photolyse transformiert werden (Rúa-Gómez & Püttmann, 2013; Rühmland et al. 2015). Dagegen gelten Carbamazepin, Primidon und Benzotriazol als vergleichsweise abbauresistent und daher als geeignete Tracer für Abwasser aus kommunalen Kläranlagen (Scheurer et al., 2011; Drewes et al., 2018).

Es war auffällig, dass der Zufluss der Havel bei Diclofenac und Sulfamethoxazol nicht zu einer Frachtzunahme in der Elbe bei Schnackenburg führte, wie es beispielsweise bei Carbamazepin und Gabapentin der Fall war. Zur unteren Havel liegen für das Jahr 2020 Analysenergebnisse von Arzneistoffen vor (FGG Elbe, 2022). Danach ergibt sich als Mittelwert aus vier monatlichen Stichproben von Anfang Juli bis Anfang Oktober 2020 eine Tagesfracht der unteren Havel bei Havelberg (Toppel) für Diclofenac von lediglich 8 g/d und für Sulfamethoxazol von nur 20 g/d. Dagegen errechnen sich für Carbamazepin im Mittel 104 g/d und für Gabapentin 222 g/d. Da auch bei den Beprobungen im Sommer und Herbst 2020 NW-Verhältnisse vorlagen, bestätigen die Befunde den irrelevanten Beitrag der Havel zur Diclofenac- und Sulfamethoxazolfracht der Elbe während sommerlicher NW-Perioden. Dies könnte insbesondere auf verstärkten photolytischen Abbau während der langen Verweilzeiten in der Havel (Havelseen) zurückzuführen sein.

Der aus den oben genannten Gründen zu erwartende verstärkte Stoffumsatz bei NW im Sommer und Herbst führt zu Transformationsprodukten, die hier nicht betrachtet wurden und teilweise auch noch nicht bekannt sind. Unter anderem auch für zukünftige ereignisbezogene Stoffbilanzierungen stellen sie eine weitere Herausforderung dar.

Literatur

BfG – Bundesanstalt für Gewässerkunde, 2022. Datenbank organische Spurenstoffe. Referat G2: Gewässerchemie. Stand: 3/2022.

Drewes, J.E., Karakurt, S., Schmid, L., Bachmaier, M., Hübner, U., Clausnitzer, V., Timmermann, R., Schätzl, P., McCurdy, S., 2018. Dynamik der Klarwasseranteile in Oberflächengewässern und mögliche Herausforderungen für die Trinkwassergewinnung in Deutschland. UBA Texte 59/2018. München.

Eurostat, 2021. Bevölkerungszahlen der lokalen Administrationseinheiten. EU – Datensatz 2020; https://ec.europa.eu/eurostat/web/gisco/geodata/reference-data/administrative-units-statistical-units/lau#lau19.

FGG – Flussgebietsgemeinschaft Elbe, 2022. Elbe-Datenportal FIS. Stand: 3/2022; http://www.elbe-datenportal.de.

Hübner, G., Schwandt, D., 2021. Das Niedrigwasser der Elbe 2019: Auswertung des Messprogramms Extremereignisse zur Wasserbeschaffenheit. FGG Elbe (Hrsg.). Fachberichte Hochwasser / Niedrigwasser.

Kunkel, U., Radke, M., 2012. Fate of pharmaceuticals in rivers: Deriving a benchmark dataset at favorable attenuation conditions. Water Res. 46, 5551-5565.

LfULG – Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Sachsen, 2022. iDA – Datenportal Sachsen. Stand: 2/2022; https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/infosysteme/ida.

NLWKN – Niedersächsisches Landesamt für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, 2022. Chemische Messwerte Elbe / Schnackenburg. In: FGG Elbe (2022); Ergänzung in BfG: Messprogramm Extremereignisse: Elbeniedrigwasser 2019. Stand: 12.11.2020; https://undine.bafg.de/elbe/extremereignisse/elbe_mp_extremereignisse.html.

Povodí Labe, 2020. Monitoringdaten der Elbe in Tschechien der Jahre 2018 und 2019, bereitgestellt für BfG über IKSE. Stand: 10.6.2020.

Rúa-Gómez, P.C. & Püttmann, W., 2013. Degradation of lidocaine, tramadol, venlafaxine and the metabolites O-desmethyltramadol and O-desmethylvenlafaxine in surface waters. Chemosphere 90, 1952-1959.

Rühmland, S., Wick, A., Ternes, T.A., Barjenbruch, M., 2015. Fate of pharmaceuticals in a subsurface flow constructed wetland and two ponds. Ecol. Eng. 80, 125-139.

Rutere, C., Posselt, M., Ho, A., Horn, M.A., 2021. Biodegradation of metoprolol in oxic and anoxic hyporheic zone sediments: unexpected effects on microbial communities. Appl. Microbiol. Biotechnol. 105, 6103-6115.

Schaper, J.L., Seher, W., Nützmann, G., Putschew, A., Jekel, M., Lewandowski, J., 2018. The fate of polar trace organic compounds in the hyporheic zone. Water Res. 140, 158-166.

Schaper, J.L., Posselt, M., Bouchez, C., Jaeger, A., Nützmann, G., Putschew, A., Singer, G., Lewandowski, J., 2019. Fate of trace organic compounds in the hyporheic zone: influence of retardation, the benthic biolayer, and organic carbon. Environ. Sci. Technol. 53, 4224-4234.

Scheurer, M., Storck, F.R., Graf, C., Brauch, H.-J., Ruck, W., Lev, O., Lange, F.T., 2011. Correlation of six anthropogenic markers in wastewater, surface water, bank filtrate, and soil aquifer treatment. J. Environ. Monit. 13, 966-973.

Wie PV-Freiflächenanlagen den Bodenwasserhaushalt verändern – Begleitforschung im größten Solarpark Deutschlands

Ulrike Feistel, Susanna Kettner, Jakob Ebermann, Fabian Müller, Stefan Werisch

Zusammenfassung

Als Antwort auf die Diskrepanz zwischen der weltweit steigenden Anzahl großer Photovoltaik-Freiflächenanlagen (PV-FFA) und dem geringen Wissenstand, was deren Einfluss auf die Umwelt betrifft, begann das Team Ingenieurhydrologie der HTW Dresden 2017 mit seinen Untersuchungen. Die ersten Ergebnisse an der 164 ha großen PV-FFA in Weesow-Wilmersdorf werden im Kontext der Voruntersuchungen an einer PV-FFA sowie zwei Lysimetern diskutiert, die zeigten, dass es durch Überdeckung und Beschattung von Bodenflächen zu Veränderungen im Bodenwasserhaushalt kommt. Eine wesentliche Rolle spielt dabei die Reduzierung der Evapotranspiration, die sich im Verlauf der Bodenfeuchte widerspiegelt. So wurden auf der PV-FFA in Boxberg im Mittel von acht Trockenperioden zwischen April 2019 und April 2020 die niedrigsten Bodenfeuchtewerte auf der Referenzfläche beobachtet, während unter den Modulen und zwischen den Modulreihen eine höhere Bodenfeuchte auftrat.

1. Einleitung

Im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) 2021 verpflichtet sich Deutschland, seinen Stromversorgungssektor bis 2050 CO_2-emissionsfrei umzugestalten (Bundesrat, 2020). In dem Anfang April 2022 vom Bundeskabinett verabschiedeten Osterpaket wurde entschieden, dass bereits 2035 der Strom in Deutschland nahezu vollständig aus erneuerbaren Energien stammen soll. Dies ist ein wichtiger Beitrag zum European Green Deal, der Klimaneutralität innerhalb der nächsten 30 Jahre anstrebt (European Commission, 2019). 2020 betrug der Anteil erneuerbarer Energien am Gesamtstromverbrauch 45,5 % (Umweltbundesamt, 2021), wovon 9,3 % von Photovoltaik kam (Wirth, 2021). Mit dem Ziel diesen Anteil zu erhöhen, wird der Ausbau erneuerbarer Energien weiter vorangetrieben. Konventionelle Photovoltaik-Freiflächenanlagen (PV-FFA) haben dabei ein zusätzliches technisches Potential von 226 GWp (Wirth, 2021). Flächenbeschränkungen für die Errichtung neuer PV-Anlagen haben in den letzten Jahren zu einem steigenden Interesse an Agri-Photovoltaik (APV) geführt, die die Doppelnutzung von Flächen für die Strom- und Lebensmittelerzeugung erlaubt (Wirth, 2021).

Im Bemühen um Klimaneutralität bei der Energieerzeugung entstehen weltweit immer größere PV-FFA auf der einen Seite und immer zahlreichere, wenn auch kleinere APV-Anlagen.

Bei den wenigen APV-Anlagen in Deutschland handelt es sich größtenteils um kleine Forschungs- oder Piloteinrichtungen (Weselek, 2019), wohingegen z.B. Japan bereits 1922 APV-Systeme kommerziell betreibt, in deren Schatten 120 verschiedene Kulturen angebaut werden (Tajima & Aida, 2020). Die zahlreichen Untersuchungen bezüglich APV, die auf der jährlichen internationalen Konferenz AgriVoltaics vorgestellt und diskutiert werden, konzentrieren sich auf Pflanzenwachstum und Ertrag, Rentabilität sowie technisches Design. Im Vergleich dazu gibt es nur verhältnismäßig wenige Untersuchungen zum Einfluss von PV-FFA auf die Umwelt und im Besonderen auf den Boden- und Gebietswasserhaushalt.

Hassanpour Adeh et al. (2018) untersuchte Bodenfeuchte und Mikro-Klima auf einer PV-FFA in Oregon (USA) und dokumentierte geringere Bodenfeuchte in unbeschatteten Bereichen zwischen den Modulreihen, jedoch höhere Bodenfeuchte unter den Modulen, jeweils im Vergleich zu einer Referenzfläche. Bartholomäus (2013) kam bei Untersuchungen von Bodenprofilen auf einer mit Solarmodulen bestandenen Halde in Bautzen/Nadelwitz zu ähnlichen

Ergebnissen: In 1 m Tiefe war die Bodenfeuchte 5 bis 10 % höher als auf der Referenzfläche. Dieser Trend war in 60 cm Tiefe bereits weniger ausgeprägt und in 20 cm waren die Unterschiede nur noch gering.
Verdunstung, ein für die oberflächennahe Bodenfeuchte maßgeblicher Prozess, der von der Beschattung mit PV-Modulen beeinflusst wird, war der Gegenstand von Untersuchungen auf einer Testfläche nahe der Mu Us Wüste in China. Liu et al. (2019) fanden, dass die Verdunstung auf der Referenzfläche doppelt so hoch war wie unter den Modulen und auch höher (1,5-fach) als zwischen den Modulreihen. Diese Ergebnisse wurden auch durch Modelle zur Bestimmung der potentiellen Verdunstung unter Solarmodulen für verschiedene Klimazonen von Makaronidou (2020) bestätigt. Die Modelle zeigen für aride Gebiete eine doppelt so hohe und in äquatorialen Gebieten eine dreifach höhere potentielle Verdunstung auf der Referenzfläche im Vergleich zu unter den Modulen, wohingegen keine signifikanten Unterschiede für die gemäßigte Klimazone gefunden wurden. An einem Untersuchungsstandort in Großbritannien fand der Autor höhere Bodenfeuchtewerte unter den Modulen im Vergleich zu zwischen den Reihen während der Wachstumsperiode; jedoch ein umgekehrtes Bild außerhalb dieser Periode.
Yue et al. (2021) fanden bei ihren Untersuchungen an einer PV-Anlage in einer Wüstenregion Chinas ebenfalls saisonale Unterschiede in der Verteilung der Bodenfeuchte. Die Unterschiede waren während der Regenzeit am ausgeprägtesten, wohingegen die Bodenfeuchte in 40 cm während der Trockenzeit auf der Referenzfläche und unter den Modulen gleichermaßen niedrig war. Yue et al. (2021) führten außerdem vergleichende Betrachtungen unter starren Modulen und unter einachsigen verstellbaren Modulen durch, wobei sie eine höhere Bodenfeuchte unter den starren Modulen beobachteten. Elamri et al. (2018) haben die Umverteilung des Niederschlags durch Solarmodule modelliert und darauf aufbauend Szenarien mit dem Ziel entwickelt, die räumliche Heterogenität der Bodenfeuchte zu minimieren. Luo (2019) konzentrierte sich bei ihren Untersuchungen auf die Bodenfeuchteverteilung und im Speziellen auf den konzentrierten Abfluss von Niederschlag an der Tropfkante der Module. Messungen und Modellergebnisse zeigen lediglich eine leicht erhöhte Perkolation entlang des Abtropfstreifens im Vergleich zur Fläche zwischen den Modulreihen. Cook and McCuen (2013) modellierten die hydrologische Gebietsantwort einer Fläche mit Solarmodulen und fanden nur geringfügige Veränderungen im Abflussvolumen und Scheitelabfluss unter der Voraussetzung, dass die Landnutzung unverändert blieb.
Als Antwort auf die Diskrepanz zwischen der weltweit steigenden Anzahl großer Photovoltaik-Freiflächenanlagen (PV-FFA) und dem immer noch geringen Wissenstand, was deren Einfluss auf die Umwelt und im Besonderen das System Wasser-Boden-Pflanze betrifft, begann das Team Ingenieurhydrologie der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (HTWD) 2017 mit seinen Untersuchungen.
Voruntersuchungen zum Verständnis und zur Eingrenzung der dominanten Prozesse sowie zur Ableitung eines Messkonzeptes wurden an einer mittelgroßen PV-FFA, einer APV-Forschungsanlage sowie an zwei Lysimetern in Deutschland und einer APV-Forschungsanlage in Kenia durchgeführt.

Aktuelle Untersuchungen mit dem entwickelten Messkonzept werden seit August 2020 an der derzeit größten PV-FFA des Energieversorgers EnBW in Weesow-Wilmersdorf durchgeführt. Die ersten Ergebnisse werden im Kontext der Voruntersuchungen diskutiert.

2. Material und Methoden

2.1 Voruntersuchungen

2.1.1 Hypothesen

Die Umverteilung des Niederschlages durch Überdeckung und die Veränderung der Verdunstung durch Beschattung von Bodenflächen bewirken entsprechende Veränderungen in Quantität und Verteilung von Bodenfeuchte, Infiltration und Versickerung sowie Grundwasserneubildung. Die zwei folgenden Hypothesen (H) wurden im Vorfeld der Voruntersuchungen formuliert:

H1: Durch Teilbeschattung kommt es zu einer Verringerung der Verdunstung, ein in den Sommermonaten dominanter Prozess.

H2: Durch an der Tropfkante konzentrierten Niederschlag kommt es zu einer erhöhten Infiltration, Versickerung und Grundwasserneubildung, ein in den Wintermonaten dominanter Prozess.

2.1.2 Messkonzept

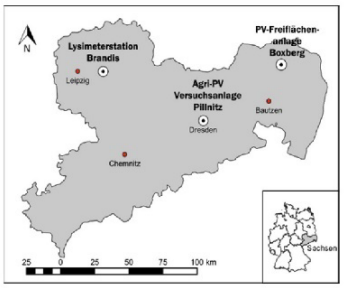
Zur Überprüfung der Hypothesen sowie deren Weiterentwicklung wurde ein entsprechendes Messkonzept entwickelt. Die Bodenfeuchte dient dabei als zuverlässig zu messender Indikator, der Veränderungen in den Komponenten der lokalen Wasserbilanz integrativ erfasst. Änderungen von Niederschlag und Verdunstung aber auch von Infiltration und Versickerung spiegeln sich in der Bodenfeuchte wider, wobei die räumliche Verteilung innerhalb einer Fläche mit Modulreihen je nach Position und Anlagendesign stark variieren kann.

Die Voruntersuchungen an den PV-FFA und APV-Forschungsanlagen sowie die Messungen in Weesow-Wilmersdorf konzentrieren sich auf die Erfassung der zeitlichen und räumlichen Verteilung der Bodenfeuchte. Hierzu werden Bodenfeuchteprofile bis zu 1 m Tiefe entlang von Transsekten senkrecht zu den Modulreihen an der untersten Tropfkante, unter den Modulen und zwischen den Modulreihen sowie auf einer Referenzfläche durchgeführt. Diese werden je nach Schwerpunkt der Untersuchungen durch weitere Parameter wie Bodentemperatur, Luftfeuchte und -temperatur sowie Globalstrahlung ergänzt.

2.1.3 Standorte und Messungen

Die Voruntersuchungen wurden zwischen 2017 und 2021 in Sachsen durchgeführt; Informationen zur Lage der Standorte, deren Beschreibung sowie ein Überblick über die Messungen sind in Abbildung 1 zu finden. Erste Messungen begannen auf der 2009 auf einer Deponie in Boxberg errichteten PV-FFA. Zusätzlich wurde in Zusammenarbeit mit der Staatlichen Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft des Freistaates Sachsen auf der Lysimeterstation in Brandis bei Leipzig ein Lysimeter mit einem Solarmodul beschattet. Der Versuchsaufbau ist so konstruiert, dass der Niederschlag analog einer Modulkante mittig auf das Lysimeter fällt. Auf einer Versuchsfläche der HTW Dresden in Pillnitz wurde eine kleine höher aufgeständerte PV-Versuchsanlage aufgebaut, unter welcher zu den Untersuchungen zum

Bodenwasserhaushalt erste Untersuchungen zum Pflanzenwachstum unter Solarmodulen durchgeführt wurden.



	Deponie Boxberg	Versuchsanlage Pillnitz	Lysimeterstation Brandis
BF 6 Tiefen unter den Modulen	●	●	
BF 6 Tiefen unter Tropfkante	●	●	
BF 6 Tiefen zwischen Modulreihen	●	●	
BF 6 Tiefen Referenzfläche	●	●	
Meteorologische Parameter Referenzfläche	●	●	●
ET unter Modul und Referenzfläche			●
Sickerwasser unter Modul und Referenzfläche			●
Typ	PV-FFA	Agri-PV	Lysimeter
Anzahl übereinander angeordneten Module	2	2	1
Boden	Verdichteter Sand	Parabraunerde	Braunerde
Vegetation	Gras	Gemüse	Feldkulturen
Mittlerer Jahresniederschlag	639 mm	668 mm	500 mm

Abb. 1: Lage- und Standortbeschreibung sowie Überblick über die durchgeführten Messungen der Voruntersuchungen

2.2 Untersuchungen im Solarpark Weesow-Wilmersdorf

Die PV-FFA der Firma EnBW nordöstlich von Berlin (Abbildung 2) wurde 2020 gebaut und ist seit 2021 in Betrieb. Mit einer Gesamtfläche von 164 ha ist sie die derzeit größte Anlage in Deutschland. Die HTWD begleitet den Betrieb der Anlage mit einer Langzeitstudie zum Einfluss solcher Anlagen auf den Wasserhaushalt. Informationen zum Standort und den derzeitigen Messungen sind in Tabelle 1 (Reibetanz et al., 2010) zusammengefasst.

3. Ergebnisse und Diskussion

Es wird im Folgenden lediglich auf die Auswirkung der Bedeckung und Beschattung von Flächen, d.h. den Vergleich von Referenzfläche mit den Flächen unter den Modulen und zwischen den Modulreihen, eingegangen.

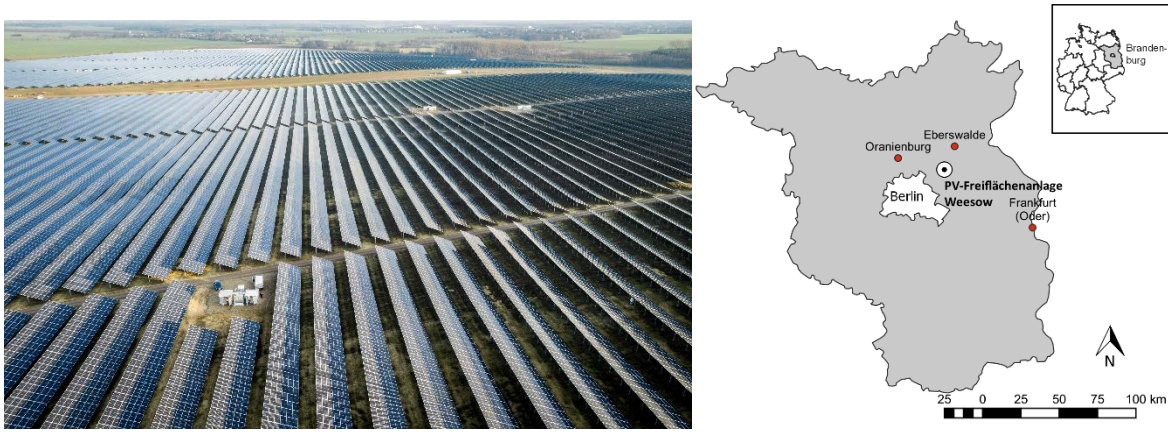


Abb. 2: Lage und Luftaufnahme des EnBW-Solarparks Weesow-Wilmersdorf

Tab. 1: Informationen zu PV-FFA und Messungen in Weesow-Wilmersdorf

Information	Details
Boden	Sand-Geschiebelehm-Mosaike auf Moräneneinsenkungen
Bewuchs	Standortgerechte Kräuter-Grasmischung
Mittlerer Jahresniederschlag	575 mm
Fläche	164 ha
Anzahl der übereinander angeordneten Module	6
Höhe Aufständerung oben/unten	0,80 m / 2,15 m
Typ Bodenfeuchtemesssonden (BF)	TDR Sonden PR2/6 der Fa. Delta-T Devices
Messpunkte BF	3x Freifläche, 3x unter den Modulen 10, 20, 30, 40, 60 und 100 cm
Niederschlagsmesser (NM)	Kalyx der Firma EML Ltd.
Messpunkt NM	Freifläche
Beginn der BF-Messungen/NM Freifläche	09.06.2020
Beginn der BF-Messungen unter den Modulen	15.10.2021
Messintervall	10 min

3.1 Voruntersuchungen am Standort Boxberg

Die Voruntersuchungen in Boxberg und Pillnitz zeigen, dass in Trockenperioden der Rückgang der Bodenfeuchte in den obersten Bodenschichten unter den Modulen (BF_{UM}) im Vergleich zur Referenzfläche (BF_{Ref}) reduziert ist. Beispielhaft werden hier Ergebnisse vom Standort Boxberg diskutiert.

Im Mittel von acht Trockenperioden zwischen April 2019 und April 2020 betrug der prozentuale Rückgang der Bodenfeuchte in 10 cm Tiefe 18,6 % ± 11,5 % unter den Modulen und 42,4 % ± 10,0 % auf der Referenzfläche.

Abbildung 3 zeigt den Verlauf der Bodenfeuchte in 10 cm Tiefe unter den Modulen (blau) und auf der Referenzfläche (schwarz) vom 29.05.19 bis 04.07.2019. Nach Niederschlägen im April und Mai kam es zu einer Auffeuchtung auf beiden Flächen (BF_{Ref}=28,6 %, BF_{UM}=20,6 %). Nach einer Periode mit geringem Niederschlag ist die Bodenfeuchte am 04.07.2019 auf der Referenzfläche auf BF_{Ref}=2,7 % gesunken und unter den Modulen auf BF_{UM}=4,1 %. Dies entspricht mittleren Gradienten von 2,6 %BF/Tag (Referenzfläche) und 1,6 %BF/Tag (unter den

Modulen) über den Gesamtzeitraum, wobei zu Beginn der Trockenperiode der Unterschied deutlicher ausgeprägt ist und mit abnehmender Bodenfeuchte geringer wird.

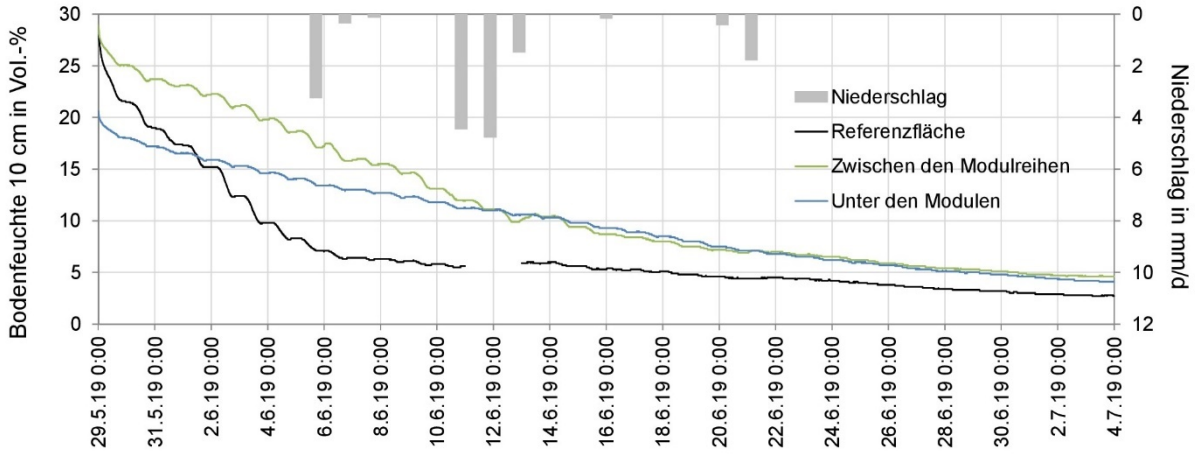


Abb. 3: Bodenfeuchteverlauf in 10 cm unter den Modulen, zwischen den Modulreihen und auf der Referenzfläche am Standort Boxberg, 29.05.2019 – 04.07.2019

In Trockenperioden ist der Rückgang der Bodenfeuchte im Wesentlichen auf Verdunstung zurückzuführen, was sich in den ausgeprägten Tagesgängen der Bodenfeuchte widerspiegelt. Entsprechend erlauben die Ergebnisse den Rückschluss, dass auf den Flächen unter den Modulen die sommerlichen Verdunstungsverluste geringer sind. Dies wird auch durch die Ergebnisse der Untersuchungen auf der Lysimeterstation Brandis bestätigt, wo die Verdunstung von Lysimetern mit und ohne Solarmodul gemessen wird (Feistel et al., 2022).
Neben dem geringeren Verdunstungsverlust ist die Bodenfeuchte unter den Modulen durch ein geringeres Niederschlagsdargebot im Vergleich zur Referenzfläche charakterisiert. Dies spiegelt sich in der Differenz der Ausgangsbodenfeuchte am 29.05.2022 wider.
Vergleicht man den Verlauf der Bodenfeuchte auf Referenzfläche mit der Fläche zwischen den Modulreihen (schwarze und grüne Linie in Abbildung 3), so ist diese Differenz geringer, d.h. zwischen den Modulreihen ist das Niederschlagsdargebot mit dem der Referenzfläche vergleichbar. Der Rückgangsgradient ist auf Grund der geringeren Beschattung und damit höheren Evapotranspiration im Vergleich zu den Flächen unter den Modulen mit 2,0 %BF/Tag etwas höher als auf diesen Flächen.
Für die betrachtete Periode ist die mittlere Bodenfeuchte auf der Referenzfläche mit BF_{Ref}=7,0 % am geringsten. Der aus dem Anlageneinfluss resultierende geringere Verdunstungsverlust unter den Modulen (UM) und zwischen den Modulreihen (ZMR) spiegelt sich in höheren mittleren Bodenfeuchtewerten BF_{UM}=9,8 % und BF_{ZMR}=11,5 % wieder.
Die niedrigere Verdunstung unter den Modulen und eine daraus resultierende höhere Bodenfeuchte im Vergleich zur Referenzfläche entspricht den Ergebnissen von Hassanpour Adeh et al. (2018), Bartholomäus (2013) und Liu et al. (2019).

3.2 Erweiterte Hypothesen

Dennoch wäre eine Verallgemeinerung verfrüht, da die Dynamik von Niederschlagsdargebot und Verdunstung insbesondere unter den Modulen komplex ist. Das Niederschlagsdargebot hängt stark von Windrichtung und Windgeschwindigkeit ab (Erpul et al., 2003), während die Verdunstung selbst auch eine Funktion der Bodenfeuchte ist.

Zusätzlich können je nach Standortbedingungen die Einflüsse von PV-Anlagen auf die Prozesse des Wasserhaushaltes unterschiedlich ausfallen. Dabei spielen Boden, Hangneigung, lokales Klima aber auch das Design der Anlage ebenso eine Rolle wie die räumliche Skala der Untersuchungen. Die Erfassung der kleinräumigen Differenzen erfordert dabei ein anderes Vorgehen als die Betrachtung möglicher Veränderungen im Einzugsgebiet.

Die aufgestellten Hypothesen wurden entsprechend erweitert (s. Abbildung 4).

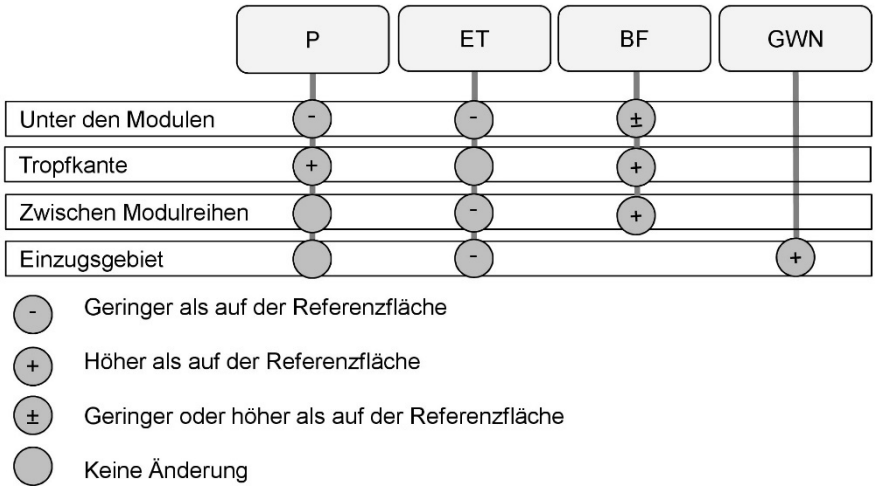


Abb. 4: Erweiterte Hypothesen zum Einfluss von PV-Anlagen auf Niederschlag (P), der Evapotranspiration (ET), der Bodenfeuchte (BF) und Grundwasserneubildung (GWN)

3.3 Solarpark Weesow-Wilmersdorf

Ab 15.10.2021 liegen gleichzeitige Messungen der Bodenfeuchte unter den Modulen (BF_{UM}) und auf der Referenzfläche (BF_{Ref}) vor, wobei nunmehr jede Messung dreifach wiederholt wird. Die ersten Ergebnisse bestätigen die Erkenntnisse aus den Voruntersuchungen zur verringerten Verdunstung unter den Modulen.

Abbildung 5 zeigt den Verlauf der Bodenfeuchte in 10 cm Tiefe unter den Modulen und auf der Referenzfläche vom 23.10.2021 bis 02.11.2021. Hier sind die Ausgangsbedingungen bezüglich der Bodenfeuchte unterschiedlich (BF_{Ref}=13,5 %, BF_{UM}=10,9 %). Während der folgenden niederschlagsfreien und noch warmen Periode sinkt die Bodenfeuchte in 10 cm Tiefe auf der Referenzfläche auf BF_{Ref}=10,8 %, die Bodenfeuchte unter den Modulen zeigt nur eine geringe Veränderung auf BF_{UM}=10,8 %. Dies entspricht täglichen Rückgangsgradienten von 0,27 %BF/Tag und 0,02 %BF/Tag. Während auf der Referenzfläche weiterhin Verdunstung stattfindet, kommt diese in den beschatteten Bereich unter den Modulen bereits zum Erliegen.

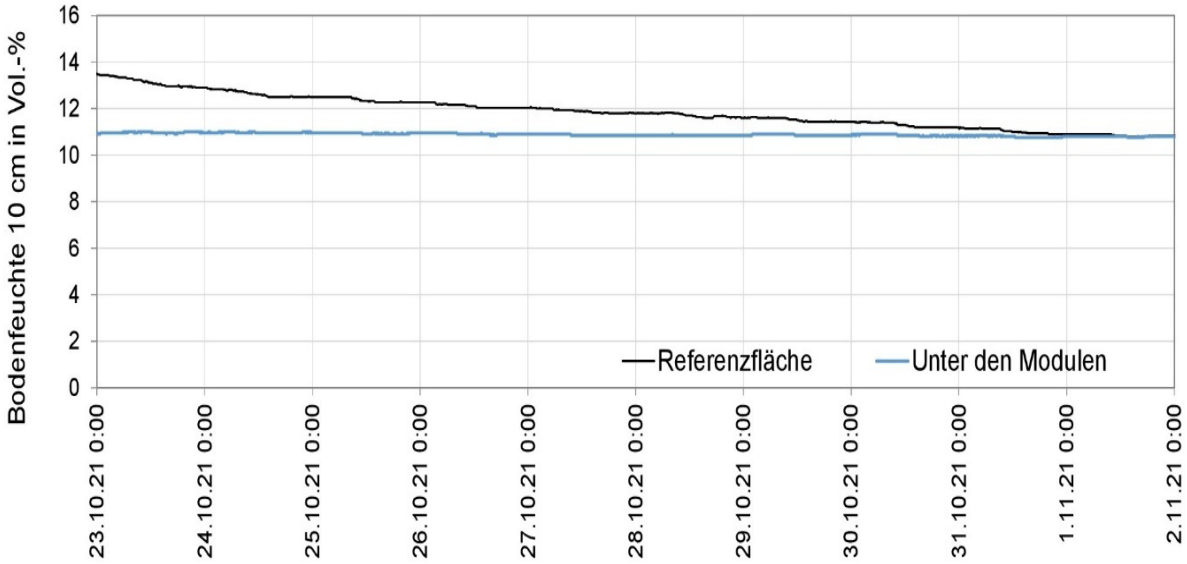


Abb. 5: Bodenfeuchteverlauf in 10 cm unter den Modulen und auf der Referenzfläche am Standort Weesow-Wilmersdorf, 23.10.2021 – 02.11.2021

Während der sich anschließenden feuchteren Wintermonate November 2021 bis Januar 2022 (Abbildung 6) spielt die Verdunstung keine signifikante Rolle mehr, vielmehr dominiert das unterschiedliche Niederschlagsdargebot auf den Flächen den Verlauf der Bodenfeuchte. Ausgehend von gleicher BF auf beiden Flächen (10,8 %) steigt diese auf der Referenzfläche als Reaktion auf den Niederschlag bis auf 20,8 % an, während die BF unter den Modulen sich kaum verändert, d.h. der Niederschlag diese Flächen nicht erreicht. Hier spielen Windrichtung und Windgeschwindigkeit, wie in Erpul et al. (2003) beschreiben, eine Rolle; Verallgemeinerungen bedürfen einer gründlichen Analyse. Der starke Rückgang der Bodenfeuchte im Dezember 2021 ist auf den gefrorenen Boden zurückzuführen; diese Messwerte repräsentieren lediglich den Anteil an Wasser, der nicht gefroren ist.

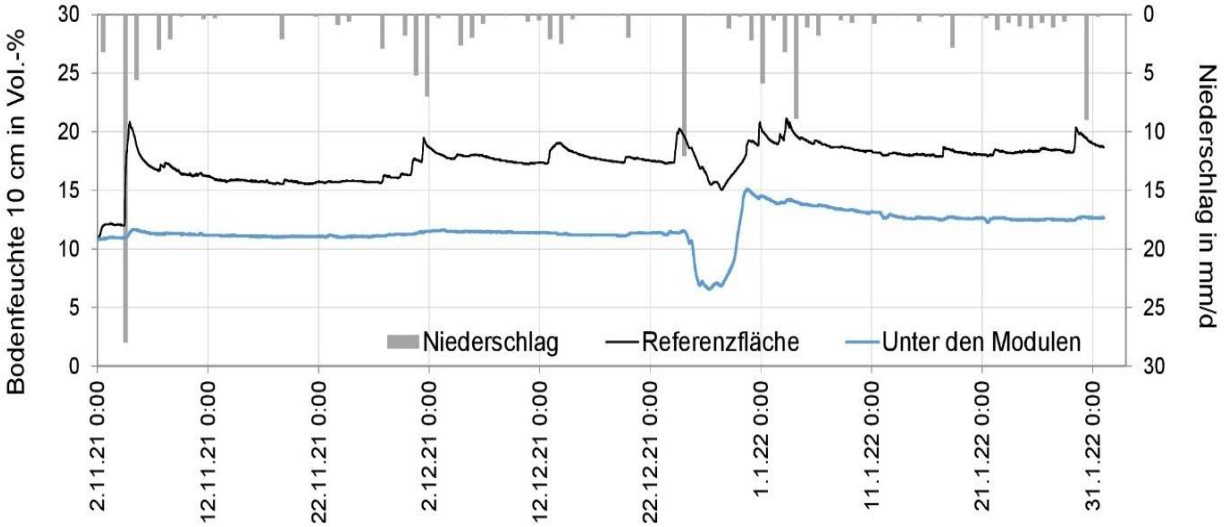


Abb. 6: Mittlerer Bodenfeuchteverlauf in 10 cm Tiefe unter den Modulen und auf der Referenzfläche am Standort Weesow-Wilmersdorf, 02.11.2021 – 31.01.2022

4 Zusammenfassung und Ausblick

Voruntersuchen und erste Ergebnisse einer begleitenden Langzeitstudie zum Einfluss von PV-Anlagen auf den Bodenwasserhaushalt zeigen, dass es durch Beschattung und Bedeckung (unter den Modulen) und Teilbeschattung (zwischen den Modulreihen) zu räumlichen und quantitativen Veränderungen von Niederschlag und Evapotranspiration kommt. Die Bodenfeuchte ist ein wichtiger Indikator zum Prozessverständnis.

In Trockenperioden kann die Evapotranspiration über den Bodenfeuchterückgang quantifiziert werden (Hess et al., 2021). Die Untersuchungen an der PV-FFA Weesow-Wilmersdorf werden nunmehr durch weiterführende Messungen u.a. mit Lysimetern sowie Modellierung der ungesättigten Bodenzone ergänzt, um die überarbeiteten Hypothesen nachzuverfolgen und die Verteilungsmuster auf die Fläche der Anlage zu skalieren. Da die Veränderungen von Standortfaktoren wie Klima, Boden, Vegetation aber auch dem Typ der Anlage abhängen, sind Untersuchungen auf weiteren Flächen geplant, die dem Rechnung tragen.

Danksagung

Die Voruntersuchungen wurden durch das Sächsische Ministerium für Wissenschaft und Kunst (Fördernummern 100316917 und 100333268) gefördert. Das Ingenieurbüro Maus gewährte die Erlaubnis zu den Untersuchungen auf der PV-FFA in Boxberg. EnBW erlaubt und unterstützt die Langzeitstudie auf der PV-FFA in Weesow-Wilmersdorf.

Literatur

Bartholomäus, U., 2013. Bodenwasserhaushalt einer Rekultivierungsschicht unter dem Einfluss einer Photovoltaikanlage: Zusammenfassung zum Vortrag auf dem Statusseminar am 07.06.2013.

Bundesrat, 2020. Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften: Gesetzentwurf der Bundesregierung, 569/20.

Delta-T Devices, 2016. User manual for the SDI-12 Profile Probes. Version 4.1, Cambridge.

Elamri, Y., Cheviron, B., Mange, A., Dejean, C., Liron, F., Belaud, G., 2018. Rain concentration and shelter-ing effect of solar panels on cultivated plots. Hydrology and Earth System Sciences, 22(2), 1285-1298.

Erpul, G., Norton, L. D., Gabriels, D., 2003. The effect of wind on raindrop impact and rainsplash de-tachment. Transactions of the ASAE. 46. 10.13031/2013.12548.

European Commission, 2019. The European Green Deal: Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, Brussels, 640.

Feistel, U., Werisch, S., Marx, P., Kettner, S., Ebermann, J., Wagner, L., in preparation. Assessing the Impact of Shading by Solar Panels on Evapotranspiration and Plant Growth Using Lysimeters. AIP Conference Proceedings.

Hassanpour Adeh, E., Selker, J. S., Higgins, C., 2018. Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency, in: PloS one 13, 11.

Hess, A., Wadzuk, B., Welker, A., 2021. Evapotranspiration estimation in rain gardens using soil moisture sensors. Vadose Zone Journal. 20. 10.1002/vzj2.20100.

Liu, Y., Zhang, R., Huang, Z., Cheng, Z., López-Vincente, M., Ma, X., Wu, G., 2019. Solar photovoltaic panels significantly promote vegetation recovery by modifying the soil surface microhabitats in an arid sandy ecosystem, Land Degradation & Development 30, 18, 2177–2186.

Luo, Y., 2019. Moisture dynamics of a near-surface desert soil. UNLV Theses, Dissertations, Professional Papers and Capstones. 3822.

Makaronidou, M., 2020. Assessment on the Local Climate Effects of Solar Photovoltaic Parks. Lancas-ter, Lancaster University, Lancaster Environment Centre. Dissertation submitted for the degree of Doc-tor of Philosophy.

Reibetanz, S., Böhm, I., Schuch, C., Günnewig, D., Püschel, M., Rohr, A., de Beer, H., Herzog, F., Becker, C., Gausling, T., Kubal, C., Stoefer, M., 2010. Bebauungsplan „Energiepark Weesow-Willmersdorf“, Begründung einschl. Umweltbericht.

Tajima, M., Aida, T., 2020, 14.-16. Oktober. Evolution of Agrivoltaic Farms in Japan. Conference paper, AgriVoltaics 2020 - the 1st world congress on agrivoltaic systems, Perpignan, France.

Umweltbundesamt, 2021. Erneuerbare Energien in Deutschland. Daten zur Entwicklung im Jahr 2020.

Weselek, A., Ehmann, A., Zikeli, S., Lewandowski, I., Schindele, S., Högy, P., 2019. Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. A review. In: Agronomy for Sustainable Development 39, Nr. 4, 35.

Wirth, H., 2021. Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland.

Yue, S., Guo, M., Zou, P., Wu, W., Zhou, X., 2021. Effects of photovoltaic panels on soil temperature and moisture in desert areas. Environmental science and pollution research international.

Entwicklung von Konzepten für ein Binnenhochwasserrisikomanagement in den nordwestdeutschen Küstenniederungen

Helge Bormann, Jan Spiekermann, Jenny Kebschull, Nadine Kramer, Jürgen Meyerdirks, Peter Schaal

Zusammenfassung

Die tiefliegenden Flächen entlang der Nordseeküste sind vor dem Hintergrund des projizierten Klimawandels neben Sturmfluten auch durch intensiver werdende Niederschlagsabflüsse aus dem Deichhinterland bedroht. Diese Risiken stellen die Binnenentwässerung der Marschgebiete vor große Herausforderungen. Die Eintrittswahrscheinlichkeit extremer Ereignisse, die zu Binnenhochwässern führen, wird künftig aller Voraussicht nach erheblich steigen. Die nach EU-Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie entwickelten Konzepte und Produkte für den Küstenraum basieren bislang allerdings allein auf der Betrachtung von Sturmflutgefahren und -risiken, wohingegen die Gefahren und Risiken möglicher Binnenhochwasserereignisse in den Küstenniederungen nicht berücksichtigt werden. Im Rahmen des KLEVER-Risk-Projekts werden deswegen vielfältige Pilotmaßnahmen konzipiert, um das Binnenhochwasserrisiko auch zukünftig bewältigen zu können. Wesentliche Aspekte sind dabei eine verbandsübergreifende Kooperation der Entwässerungsverbände, ein stärkerer Fokus auf Retentionslösungen im Binnenland, die Ableitung von Binnenhochwassergefahrenkarten und die Erstellung verbandlicher Hochwasser-Alarmpläne. Darüber hinaus werden weitere Ansatzpunkte aus dem Spektrum des Hochwasserrisikomanagementzyklus, wie raumplanerischer Aspekte und die Eigenvorsorge der Bevölkerung, in den Blick genommen.

1. Einführung

Aktuelle Analysen im Küstenraum zeigen, dass sich in der nordwestdeutschen Küstenregion unter Annahme des projizierten Klimawandels neben Sturmfluten auch die Niederschlagsabflüsse aus dem Deichhinterland intensivieren werden und damit die Binnenentwässerung vor große Herausforderungen gestellt wird (Bormann et al., 2018; Spiekermann et al., 2018). Die Eintrittswahrscheinlichkeit von extremen Ereignissen, die zu Binnenhochwässern führen, wird künftig aller Voraussicht nach erheblich steigen. Soll das Hochwasserrisiko nicht in gleichem Maße zunehmen, müssen geeignete Maßnahmen des Risikomanagements konzipiert und umgesetzt werden, die zu einer Steigerung der (Klima-)Resilienz von Küstenräumen beitragen.

Die verfügbaren Studien aus dem nordwestdeutschen Küstenraum weisen auch darauf hin, dass technischer Hochwasserschutz und steuerbare Retentionskapazitäten allein die zukünftige Problematik nicht werden lösen können, sondern ebenfalls Maßnahmen verfolgt werden müssen, die auf eine signifikante Senkung und ein Management des Schadenspotenzials abzielen. Diese Aufgabe kann nur mit integrativen, verbandsübergreifenden Ansätzen sowie im Verbund aller relevanten Akteure einschließlich der Bevölkerung gelöst werden. Dieser Ansatz, der explizit im KLEVER-Risk-Projekt (Klimaanpassung und Extremwettervorsorge – Verbandsübergreifendes Management von Binnenhochwasserrisiken im westlichen Ostfriesland) verfolgt wird, steht im Einklang mit der Kernaussage der „Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel“ (Bundeskabinett, 2008), dass die Anpassung an die Folgen des Klimawandels eine gesamtgesellschaftliche Herausforderung darstellt, die ein querschnittsorientiertes Handeln und ein Zusammenwirken öffentlicher und privater Akteure erfordert.

2. Das Projekt KLEVER-Risk

Ziel des vom BMUV geförderten Projekts KLEVER-Risk ist es, aufbauend auf den Ergebnissen von Ahlhorn et al. (2018), Bormann et al. (2018) und Spiekermann et al. (2018) Konzepte für eine Reduzierung des Binnenhochwasserrisikos unter Berücksichtigung künftiger klimatischer Veränderungen in den nordwestdeutschen Küstenniederungen zu entwickeln und die dafür notwendigen Akteursnetzwerke zu stärken. Der Fokus liegt dabei auf dem verbandsübergreifenden Management von Binnenhochwasserrisiken im Küstenraum.

Am Beispiel der Gebiete der vier benachbarten Entwässerungsverbände Emden, Norden, Aurich und Oldersum werden die Potenziale des gesamten Spektrums der unterschiedlichen Handlungsbereiche des Hochwasserrisikomanagements untersucht, Defizite identifiziert und Konzepte für Verbesserungsmöglichkeiten entwickelt. Dies schließt verbandsübergreifende Lösungen explizit mit ein. Das bestehende Akteursnetzwerk in der Region wird gefestigt und durch weitere relevante bzw. betroffene Akteure erweitert, um die Wirkung der einzelnen Risikomanagementmaßnahmen sowie deren Synergieeffekte zu maximieren.

2.1 Der Betrachtungsraum

Der Betrachtungsraum von KLEVER-Risk liegt im westlichen Ostfriesland und erstreckt sich über die Verbandsgebiete der vier benachbarten Entwässerungsverbände Emden, Norden, Aurich und Oldersum (Abbildung 1). Er umfasst die kreisfreie Stadt Emden, einen Großteil des Landkreises Aurich sowie Teilbereiche der Landkreise Leer und Wittmund. Innerhalb des ca. 1.330 km² großen Betrachtungsraums befindet sich zudem eine zweistellige Zahl an kreisangehörigen Städten und Gemeinden, die vollständig oder anteilig in den vier Verbandsgebieten liegen. In größeren Teilbereichen des Betrachtungsraums liegen die Geländeoberflächen unterhalb von Normalhöhen-Null (NHN), der tiefste Punkt liegt bei -2,5 m NHN. Aufgrund der topographischen Gegebenheiten stellt die Binnenentwässerung eine Grundvoraussetzung für die Besiedlung und die landwirtschaftliche und gewerbliche Nutzung dieser Region dar. Ohne ein zuverlässiges Entwässerungsmanagement würde es in den eingedeichten Küstenniederungen regelmäßig zu großflächigen Überschwemmungen kommen. Nur mit Hilfe der historisch gewachsenen Entwässerungssysteme, bestehend aus überwiegend künstlich angelegten Gewässern mit regulierten Wasserständen und technischen Anlagen wie Sielen und Schöpfwerken (Abbildung 2), können überschüssige Niederschlagsmengen abgeführt und kritische Hochwassersituationen weitestgehend vermieden werden.

Bei Extremwetterereignissen, bei längerfristigem Stromausfall oder bei technischen Defekten an Sielen und Schöpfwerken besteht die grundsätzliche Gefahr, dass die Kapazitätsgrenzen der Entwässerungssysteme überschritten werden bzw. deren Funktionen teilweise oder vollständig ausfallen. Dies kann zur Folge haben, dass die Wasserstände in den Binnengewässern deutlich über die festgelegten Zielwasserstände hinaus ansteigen und es in bestimmten Gebieten zu Hochwasser- und Überschwemmungssituationen kommt, die zu Schäden an Gebäuden, Infrastrukturen und landwirtschaftlich genutzten Flächen führen können. Die Entwässerungssysteme im Betrachtungsraum stoßen in bestimmten Extremsituationen bereits heute an ihre Kapazitätsgrenzen. Besonders kritisch ist das gleichzeitige Auftreten mehrerer Ereignisse wie Starkregen und Sturmflut zu bewerten (Ereignisbündel) da bei erhöhtem Entwässerungsbedarf die Entwässerungskapazität durch hohe Außenwasserstände verringert wird.

Abb. 1: Übersicht über das Projektgebiet von KLEVER-Risk.

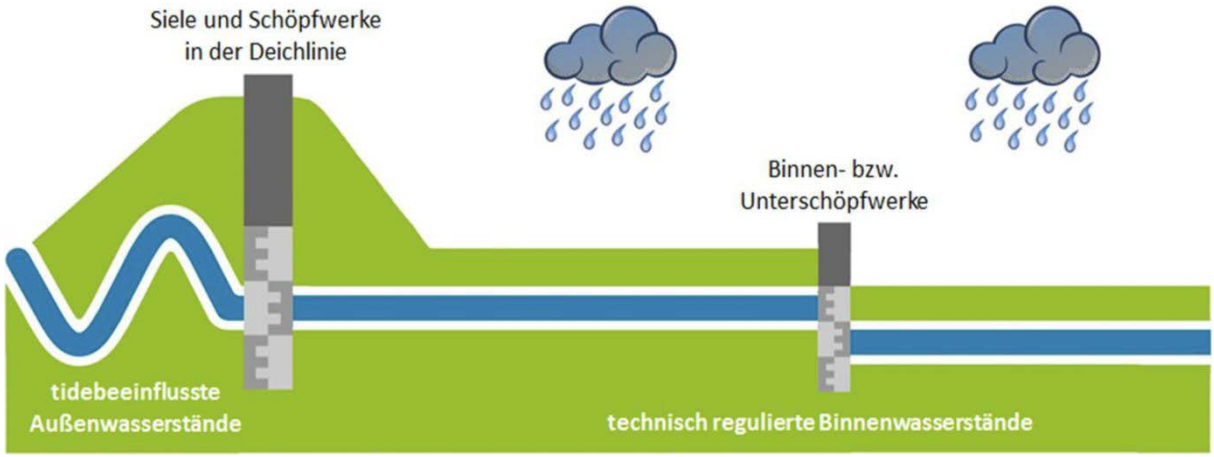


Abb. 2: Prinzipskizze der Binnenentwässerung in Ostfriesland.

2.2 Das Konzept für den Umgang mit Binnenhochwasserrisiken

Ziel des Projektes KLEVER-Risk ist, Wege aufzuzeigen, die es ermöglichen, trotz klimawandelbedingt zunehmender Intensitäten und Häufigkeiten von Extremwetterereignissen die Risiken von Binnenhochwässern in den Küstenniederungen zu senken. Der Risiko-Begriff ist definiert als Produkt aus Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadenspotenzial. Steigen also klimawandelbedingt die Eintrittswahrscheinlichkeiten von Binnenhochwasserereignissen, oder erhöht sich das Schadenspotential in der Region durch das Schaffen zusätzlicher Werte, die nicht explizit gegen Hochwasser geschützt sind, steigt auch das Risiko von Schäden aufgrund von Binnenhochwassersituationen. Als Kernbestandteile des Risikomanagements sind demnach die Reduzierung der Eintrittswahrscheinlichkeit von schadensträchtigen Binnenhochwasserereignissen und die Verminderung des Schadenspotenzials in hochwassergefährdeten Bereichen von Bedeutung (Abbildung 3). Durch Klimaanpassungsmaßnahmen in den Bereichen Vermeidung, Schutz und Vorsorge kann das Risiko gesenkt werden. Es wird aber trotz umfangreicher Anpassungsmaßnahmen unvermeidbar sein, dass ein Restrisiko verbleibt, dass durch Extremwetterereignisse Schäden verursachen werden.

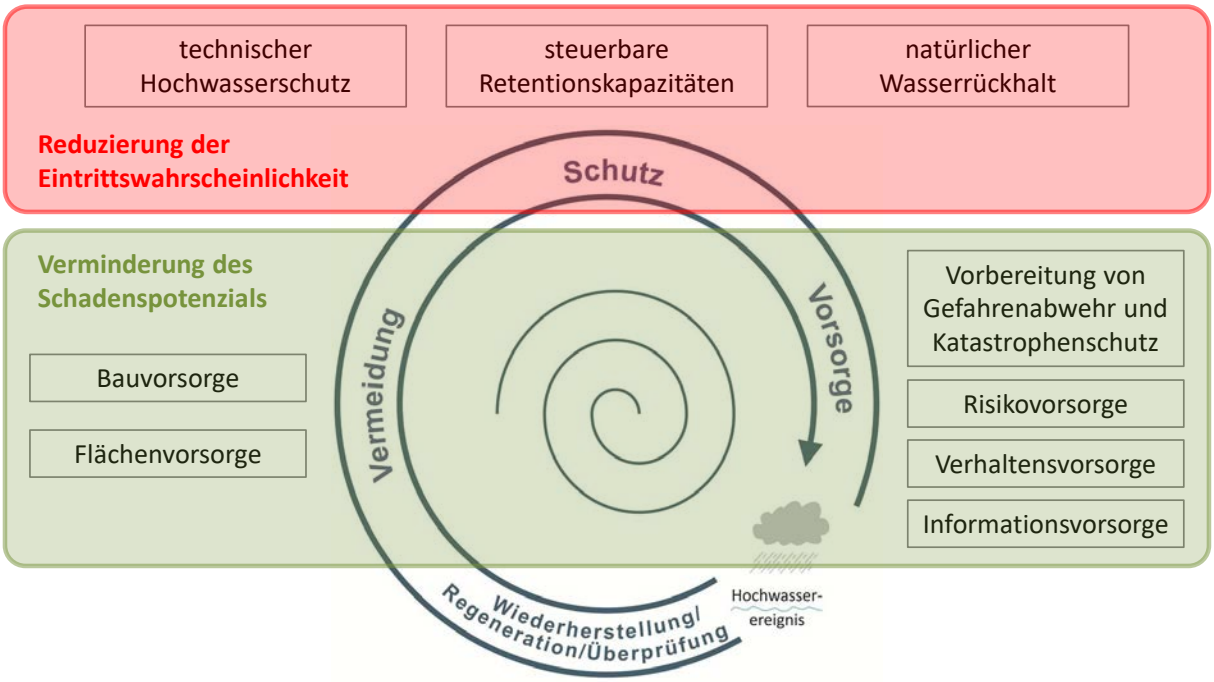


Abb. 3: Spektrum des Hochwasserrisikomanagements (verändert nach LAWA, 2013).

KLEVER-Risk stellt das bestehende Binnenhochwasserrisikomanagement im Untersuchungsgebiet auf den Prüfstand, um Empfehlungen für ausgewogene Aktivitäten hinsichtlich Vermeidung, Schutz und Vorsorge von Hochwasserrisiken im Küstenraum auszusprechen. Als Basis dafür dienen verschiedene Pilotaktivitäten in den beteiligten Verbandsgebieten.
Der in Abbildung 3 gezeigte vierte Bereich des Hochwasserrisikomanagementzyklus „Wiederherstellung/Regeneration/Überprüfung“ deckt die Evaluierung, die Nachsorge und den Wiederaufbau nach einem Hochwasserereignis ab. Mit steigendem Auftreten von Hochwasserereignissen wird auch dieser Bereich in Zukunft an Bedeutung gewinnen. Im Rahmen von KLEVER-Risk wird dieser Bereich jedoch nicht tiefergehend betrachtet.

2.3 Pilotaktivitäten

Durch den Fokus auf das Binnenhochwasserrisikomanagement wird KLEVER-Risk direkt an Aktivitäten anknüpfen, die sich nach Spiekermann et al., (2018) als für die Küstenniederungen sehr relevant herausgestellt haben:

I. Entwicklung von Lösungsansätzen zur Anpassung verbandsübergreifender Entwässerungsinfrastrukturen;
II. Identifizierung und Quantifizierung zusätzlicher Retentionskapazitäten in den Verbandsgebieten;
III. Entwicklung einer Methodik zur Erstellung von Binnenhochwassergefahren- und -risikokarten für die Küstenniederungen;
IV. Erarbeitung eines Konzepts zur Erstellung verbandlicher Hochwasser-Notfallpläne;
V. Ermittlung des Potenzials raumplanerischer Handlungsmöglichkeiten und Planungsinstrumente in der Flächenvorsorge;
VI. Sensibilisierung der Bevölkerung im Rahmen einer Informationskampagne.

3. Vorgehensweise und erste Ergebnisse der Pilotaktivitäten

3.1 Entwicklung von Lösungsansätzen zur Anpassung verbandsübergreifender Entwässerungsinfrastrukturen

Im Projektgebiet gibt es zwei verbandsübergreifende Schnittstellen der wasserwirtschaftlichen Infrastruktur: Zum einen das Speicherbecken Leyhörn mit dem Sperrwerk Leysiel, über das der I. EV Emden und der EV Norden entwässern, und zum anderen die sogenannten Emder Wasserspiele – eine komplexe Struktur aus Entwässerungskanälen und verschiedenen Schleusen und Schöpfwerken mit Anschluss an den Ems-Jade-Kanal. Über dieses System sind der EV Aurich, der EV Oldersum und der I. EV Emden an die Binnenentwässerung angebunden. Für beide Schnittstellen wurden Runde Tische etabliert, um sowohl aktuelle technische Voraussetzungen als auch Optionen für ein Management der zukünftig zu erwartenden Anforderungen zu erörtern. Ziel beider Pilotaktivitäten ist die Optimierung der verbandsübergreifenden Nutzung und ggfs. gegenseitigen Entlastung bei kritischen Entwässerungssituationen. Auf Basis einer gemeinsamen Analyse der Problemsituation mit den regionalen Akteuren wurden in einem iterativen Prozess Maßnahmenoptionen identifiziert, diskutiert und im Hinblick auf Konfliktpotenziale und Synergieeffekte beschrieben. Diese umfassen unter anderem die Bereiche der Optimierung der Steuerung, des technischen Ausbaus und der Entwicklung von technischen Alternativen.

Aufgrund der komplexen Entwässerungssituation können die Wirkungen der vorgeschlagenen Maßnahmenoptionen nicht im Detail quantifiziert werden. Trotzdem konnte im Rahmen der Runden Tische eine Priorisierung durch die Akteure erfolgen. Grundlage dieser Priorisierung waren unter anderem Überlastungssimulationen mit einem speicherbasierten Modell auf Basis der Szenariosimulationen von Bormann et al. (2018, 2022), die für die Gebiete aller beteiligten Entwässerungsverbände durchgeführt wurden.

Speicherbecken Leyhörn/Sperrwerk Leysiel: An dieser Schnittstelle entwässern die beiden Entwässerungsverbände Norden und Emden über im Binnenland gelegene Siel- und Schöpfwerke (Leybuchtsiel, Greetsiel) in das Speicherbecken Leyhörn, das wiederum über das Siel am Sperrwerk Leysiel in die Nordsee entleert werden kann. Durch den Anstieg des

Meeresspiegels und die daraus folgende Veränderung des Tideniedrig- und Tidehochwasser wird bei dem bestehenden Wasserstandsmanagement zukünftig nicht mehr ausreichend gesielt werden können, um den Status quo der Binnenentwässerung aufrecht zu erhalten. Maßnahmenoptionen liegen in der Ergänzung des Siels um ein Schöpfwerk, in der Anpassung des Wasserstandsmanagements im Speicherbecken und in der Schaffung zusätzlicher Retentionskapazitäten im Binnenland. Aufgrund der begrenzten Retentionspotenziale v.a. im Verbandsgebiet des EV Norden ist aus Sicht der Akteure langfristig die Schaffung zusätzlicher Pumpkapazitäten unumgänglich. Werden solche Kapazitäten am Standort Leysiel vorgesehen, stellt sich die Frage, ob diese eher die Grundlast oder Spitzenlast der Binnenentwässerung bewältigen können müssen. Die Beantwortung der Frage ist eng mit der Schaffung der Retentionspotenziale und dem Wasserstandsmanagement im gesamten Entwässerungssystem verknüpft.

Emder Wasserspiele/Ems-Jade-Kanal: Diese Schnittstelle zwischen den drei Entwässerungsverbänden Aurich, Emden und Oldersum ist durch eine sehr komplexe Entwässerungssituation geprägt (vgl. Spiekermann et al., 2018). Noch sind die Verbände bzgl. der Bewältigung extremer Niederschläge bei normalen Außenwasserständen gut aufgestellt. Besonders bei dem Auftreten von Kettentiden während einer Sturmflut sind zukünftig aber größere Pump- und Speicherkapazitäten in den Verbandsgebieten erforderlich, um das überschüssige Wasser schadlos bewältigen zu können. Neben lokalen Speicherlösungen wird von den Entwässerungsverbänden ein Ausbau der bestehenden Pumpkapazitäten präferiert, der an unterschiedlichen Standorten umgesetzt werden könnte. Neben dem Emder Hafen bieten sich dafür bestehende Standorte wie das Schöpfwerk Borssum oder das Petkumer Siel an.

3.2 Identifizierung und Quantifizierung zusätzlicher Retentionskapazitäten in den Verbandsgebieten

Voruntersuchungen zeigen, dass für eine Optimierung des Entwässerungsmanagements neben erhöhten Pumpkapazitäten vor allem auch zusätzlicher Retentionsraum erforderlich ist (Bormann er al., 2018; Spiekermann et al., 2018), um damit die Flexibilität der Binnenentwässerung zu erhöhen. Daher wird im Rahmen von KLEVER-Risk für alle vier beteiligten Entwässerungsverbände ein Katalog potenzieller Retentionsmaßnahmen erstellt und quantifiziert. Dabei wird folgendermaßen vorgegangen:

1) Akteursbasierte Identifikation räumlich verorteter Maßnahmenoptionen in den jeweiligen Verbandsgebieten;
2) Kategorisierung der identifizierten Maßnahmenoptionen (z.B. Polderflächen, Gewässereinstau, Retention in der Fläche);
3) Erstellung einer Übersichtskarte der verorteten Maßnahmenoptionen;
4) Erstellung von Steckbriefen für die einzelnen Maßnahmenoptionen (Maßnahmenbeschreibung, Skizzierung der erforderlichen baulichen/technischen Voraussetzungen, Abschätzung der potenziellen Retentionsvolumina anhand eines digitalen Geländemodells)
5) Maßnahmenbewertung anhand der Kriterien *Wasserwirtschaftliche Wirksamkeit*, *Realisierungsaufwand* und *Umsetzungswahrscheinlichkeit*);

6) Quantifizierung und Ranking der Wirksamkeit ausgewählter Maßnahmen bzw. Maßnahmenkombinationen.

In gemeinsamen Projekttreffen der regionalen Akteure werden zudem übergeordnete Fragestellungen im Zusammenhang mit der Konzipierung von Retentionslösungen adressiert. Diese betreffen z.B. den Wandel des Aufgabenspektrums der Verbände von reinen Entwässerungsverbänden hin zu Wasserbewirtschaftungsverbänden und die Vereinbarkeit von wasserwirtschaftlichen und naturschutzfachlichen Anforderungen im Hinblick auf die Umsetzung von Retentionsmaßnahmen. Einen weiteren Aspekt stellen die generellen Flächenkonkurrenzen mit anderen Nutzungen dar.

3.3 Entwicklung einer Methodik zur Erstellung von Binnenhochwassergefahrenkarten und -risikokarten für die Küstenniederungen

In enger Abstimmung mit den beteiligten Entwässerungsverbänden sowie regionalen Akteuren aus den Bereichen Gefahrenabwehr und Katastrophenschutz wurde eine Methodik entwickelt, um die Gefahren- und Risikokarten nach EU-Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie um den Aspekt des Binnenhochwassers in Küstengebieten zu erweitern. Ziel war es, den klimawandelbedingten Anpassungserfordernissen für ein wirkungsvolles Binnenhochwasserrisikomanagement in Küstenniederungsgebieten Rechnung zu tragen, indem zukünftige Binnenhochwassergefahren und -risiken quantifiziert und räumlich dargestellt werden.

In einem ersten Schritt wurden gemeinsam mit den regionalen Akteuren Risikofaktoren identifiziert (z.B. Starkregen, Sturmfluten, technisches Versagen von Siel- und Schöpfwerken), die für die Definition abgestufter, extremer Binnenhochwasser-Szenarien berücksichtigt wurden. Diese Szenarien dienen als Grundlage für Risikoabschätzungen und die Entwicklung von Maßnahmen zum Risikomanagement. Die räumliche Konkretisierung der Gefahrengebiete der definierten Binnenhochwasserszenarien erfolgte auf Grundlage der Quantifizierung der zu bewältigenden Wassermengen unter Berücksichtigung von Retentionspotenzialen und Geländebeschaffenheit im Projektgebiet. Durch Verschneidung der Binnenhochwassergefahrenkarten mit Informationen über Schutzgüter gemäß EU-Hochwasserrisikomanagementrichtlinie können Binnenhochwasserrisikokarten generiert werden (Bormann et al., 2022).

3.4 Erarbeitung eines Konzepts zur Erstellung verbandlicher Hochwasser-Notfallpläne

Zur Verbesserung der Hochwasservorsorge wird mit den beteiligten Entwässerungsverbänden ein gemeinsames Konzept zur Erstellung verbandlicher Hochwasser-Notfallpläne erarbeitet. Als Ausgangspunkt hierfür dient der bereits existierende Notfallplan des I. EV Emden, der inhaltlich um weitere relevante Aspekte ergänzt und in eine vereinheitlichte, verbandsübergreifend nutzbare Struktur überführt wird, die die folgenden wesentlichen Punkte umfasst:

- Definition von Hochwasser-Alarmstufen und Festlegung einer Hochwasser-Meldeordnung,
- Informationen zur Hochwassergefährdung im Verbandsgebiet (Überschwemmungsbereiche und betroffene Raumnutzungen bei bestimmten Hochwasserständen),
- Überblick der Managementoptionen im Hochwasserfall (z.B. Nutzung vorhandener Retentionskapazitäten und Abschlagsmöglichkeiten, hochwasserangepasstes Management von Unterschöpfwerksgebieten in Form einer temporären Abschaltung oder sogar einer gezielten Flutung),

- Kataster über vorhandenen Notfallausrüstung (Notstromaggregate, mobile Pumpen, Sandsäcke, Baumaschinen, etc.),
- Verzeichnis relevanter Kontaktdaten (Kommunen, Fachbehörden, Hilfsorganisationen, etc.).

Von besonderem Interesse ist darüber hinaus die Entwicklung verbandsübergreifender Notfall-Vorsorgemaßnahmen, die neben der gemeinsamen Anschaffung von Notfallausrüstung oder der gegenseitigen Unterrichtung des Schöpfwerkspersonals für einen möglichen Vertretungsfall auch Regelungen zur Steuerung verbandsübergreifender Entwässerungsinfrastrukturen im Hochwasserfall umfassen können.

3.5 Ermittlung des Potenzials raumplanerischer Handlungsmöglichkeiten und Planungsinstrumente in der Flächenvorsorge

Im Rahmen eines Runden Tisches werden Lösungsansätze für einen verbesserten Umgang mit Hochwassergefahren/-risiken in der räumlichen Planung erarbeitet. Die Schwerpunkte liegen dabei auf der Konzeption und Abstimmung einer einheitlichen, gebietskörperschaftsübergreifenden Vorgehensweise für die Bemessung von Regenrückhalteanlagen im Rahmen von Bauvorhaben sowie der Entwicklung von Lösungsansätzen zur Realisierung zentraler (ggfs. interkommunaler) Speicherpolder, die künftig als Ersatz bzw. Ergänzung der als problematisch angesehenen gegenwärtigen Praxis vieler kleiner Regenrückhaltebecken fungieren könnten. Darüber hinaus werden Ansatzpunkte zur Stärkung des Abwägungsbelanges „Hochwassergefahren/-risiken“ im Rahmen von Planungs- und Genehmigungsverfahren erörtert (z.B. Diskussion der Anforderungen an Hochwassergefahrenkarten als Abwägungsgrundlage). Zielgruppe der Aktivitäten sind kommunale Vertreter aus dem westlichen Ostfriesland.

3.6 Sensibilisierung der Bevölkerung im Rahmen einer Informationskampagne

Ein zentraler Baustein zur Verminderung des Schadenspotentials im Hochwasserfall ist die Informationsvorsorge (Abbildung 3). Wenn betroffene Personen wissen, wie sie sich, ihre Angehörigen und ihr Eigentum im Hochwasserfall schützen können, bzw. wenn Unternehmen und Institutionen Alarmpläne erarbeiten und umsetzen, kann das Schadenspotential mit geringen Aufwand signifikant gesenkt werden. Eine gut informierte Bevölkerung kann schnell, gezielt und gefasst auf Schadensereignisse reagieren. Die Voraussetzung dafür ist, dass die zentralen Informationen zu den Zielgruppen gelangen und Vorsorgemaßnahmen ergriffen werden. Dementsprechend ist das Ziel der Pilotaktivität „Informationskampagne“ die Sensibilisierung der Bevölkerung. Dafür befindet sich ein Tag der offenen Tür am Siel und Schöpfwerk Leybuchtsiel (EV Norden) im Juli 2022 in Vorbereitung, der zur Information der Bevölkerung über das Thema Binnenhochwasserrisikomanagement und die Aktivitäten des KLEVER-Risk-Projekts sowie über Möglichkeiten der Eigenvorsorge genutzt werden soll. Des Weiteren ist die Erstellung von Videoclips zu verschiedenen Themenschwerpunkten des Projektes vorgesehen, die über die Websites der Praxispartner verlinkt bzw. über die Sozialen Medien geteilt werden können. Eine wichtige Rolle spielt überdies die öffentlichkeitswirksame Platzierung des Themas in den klassischen Medien wie Presse und Rundfunk.

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Nutzung des Küstenraums erfordert spezielle Ansätze für die Quantifizierung von und den Umgang mit Binnenhochwassergefahren- und -risiken. Im Rahmen des KLEVER-Risk-Projekts werden in enger Zusammenarbeit mit den regionalen Akteuren Ostfrieslands pragmatische Ansätze für den Umgang mit Binnenhochwassergefahren und -risiken erarbeitet. Mit den Akteuren wird ein intensiver Diskussionsprozess durchlaufen, um beim Umgang mit den Binnenhochwasserrisiken das gesamte Spektrum des Hochwasserrisikomanagements zu bearbeiten und damit die Perspektive über die traditionell präferierte Pumptechnik hinaus zu erweitern. Hier ist viel Überzeugungsarbeit zu leisten, auch wenn Klimafolgenabschätzungen zeigen, dass traditionelle Lösungen nur schwerlich allein die zukünftigen Herausforderungen bewältigen können. Ein großes Potenzial wird in verbandsübergreifenden Lösungen gesehen, für deren Planung räumliche Risikoanalysen erforderlich sind.
Mit der Konzipierung von Binnenhochwasserrisiko- und -gefahrenkarten schließt das Projekt KLEVER-Risk eine Lücke in der Implementierung der EU-Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie, da für die Küstenniederungen bisher nur Gefahren- und Risikokarten für den Sturmflutfall bereitgestellt sind, die das größte Risiko darstellen. Die Erweiterung um die von Binnenhochwasser potentiell betroffenen Flächen sind für den Umgang mit extremen Entwässerungssituationen von Seiten der Entwässerungsverbände aber auch für die im Katastrophenschutz eingebundenen Institutionen von großer Bedeutung. Vor dem Hintergrund der trockenen Sommer in den vergangenen Jahren drängt sich schlussendlich auch immer mehr die zusätzliche Rolle der Entwässerungsverbände als integrative Wassermanagementverbände in den Vordergrund. Zwar nehmen die Verbände diese Rolle an, jedoch macht die Mehrzweckbewirtschaftung des Entwässerungssystems die Binnenentwässerung als ureigene Aufgabe nicht einfacher. Hier werden weitere Anstrengungen erforderlich sein, um ein solches, integratives Wassermanagement auch auf institutionell integrative Füße zu stellen.

Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) für die Förderung des Projekts KLEVER-Risk im Rahmen des DAS-Programms (Förderung von Maßnahmen zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels).

Literatur

Ahlhorn, F., Spiekermann, J., Schaal, P., Bormann, H., Kebschull, J., 2018. Akteursbeteiligung bei der Anpassung des Entwässerungsmanagements im norddeutschen Küstenraum. Wasser und Abfall 20(7/8), 28-35.

Bormann, H., Kebschull, J., Ahlhorn, F., Spiekermann, J., Schaal, P., 2018. Modellbasierte Szenarioanalyse zur Anpassung des Entwässerungsmanagements im nordwestdeutschen Küstenraum. Wasser und Abfall 20(7/8), 60-66.

Bormann, H., Kebschull, J., Spiekermann, J., Kramer, N. 2022. Eine Methodik zur Ableitung szenariobasierter Binnenhochwassergefahren- und -risikokarten im nordwestdeutschen Küstenraum. Wasser und Abfall 24(6), 12-18.

Bundeskabinett, 2008. Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Beschlossen vom Bundeskabinett am 17. Dezember 2008. Die Bundesregierung. Berlin.

European Commission, 2007. Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks.

LAWA, 2013. Empfehlungen zur Aufstellung von Hochwasserrisikomanagementplänen. beschlossen auf der 146. LAWA-VV am 26. / 27. September 2013 in Tangermünde. Magdeburg. https://www.lawa.de/documents/empfehlungen_zur_aufstellung_von_hwrmpl_mit_anlagen_1552299352.pdf

Spiekermann, J., Ahlhorn, F., Bormann, H., Kebschull, J., 2018. Zukunft der Binnenentwässerung: Strategische Ausrichtung in Zeiten des Wandels. Eine Betrachtung für das Verbandsgebiet des I. Entwässerungsverbandes Emden, Universität Oldenburg, https://uol.de/klever/ergebnisbroschuere.

Vergleichende Modellierung von Maßnahmen zur Minderung des Pestizidaustrags auf der Einzugsgebietsskala mit den Modellen SWAT und ZIN-AgriTra

Stephanie Zeunert, Johanna Schwenkel, Matthias Schöniger, Günter Meon

Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes PSMin wurde die Wirkung von Minderungsmaßnahmen auf den Austrag von Pflanzenschutzmitteln (PSM) mit Hilfe der beiden ökohydrologischen Modellen ZIN-AgriTra und SWAT untersucht. Diese Modelle wurden auf ein kleines landwirtschaftlich geprägtes Einzugsgebiet im Südosten Niedersachsens angewandt. Daten einer umfangreichen Monitoringkampagne dienten zur Kalibrierung. In mehreren Szenarien wurde unter anderem der Einfluss von Randstreifen auf den PSM-Rückhalt untersucht. Hier zeigten sich deutliche Unterschiede zwischen den prognostizierten Reduktionsleistungen der beiden Modelle, was unter anderem auf die modellinterne Implementierung von Randstreifen zurückzuführen ist. Während in SWAT nur die Minderung über Oberflächenabfluss und Erosion berücksichtigt wird, können in ZIN-AgriTra auch die weiteren Transport- und Reaktionsprozesse der PSM und ihrer Abbauprodukte innerhalb des Randstreifens abgebildet werden.

1. Einführung

Zu Sicherung von Ernteerträgen sind Pflanzenschutzmittel (PSM) ein wichtiger Bestandteil der landwirtschaftlichen Praxis. Allerdings können diese hochwirksamen Stoffe und ihre Abbauprodukte durch Niederschläge mit dem Wasser von den landwirtschaftlichen Zielflächen in angrenzende Oberflächengewässer oder das Grundwasser gelangen und dort zu einer Kontamination und Schädigung des Ökosystems führen. In der Praxis existieren verschiedene Minderungsmaßnahmen, um den Eintrag von PSM in angrenzende Gewässer zu verringern. Unter anderem können Landschaftselemente wie Gewässerrandstreifen dazu beitragen, den Eintrag von PSM infolge von Oberflächenabfluss und Erosionsprozessen zu reduzieren.

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Grundlagen der Risikominderungsmaßnahmen zur Abschwemmung von Pflanzenschutzmitteln“ (PSMin) wurde der Einfluss ausgewählter Minderungsmaßnahmen modelltechnisch untersucht. Das Projekt wurde vom Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL) gefördert, welches in Deutschland für die Zulassung von PSM zuständig ist. Hierbei wurde neben der Betrachtung der Feldskala ein Fokus auf die Einzugsgebietsskala gelegt, um die kumulative Wirkung von mehreren Feldern innerhalb eines Einzugsgebietes zu erfassen. Für die Modellierung des Wasser- und Stofftransports auf der Einzugsgebietsskala werden in der Regel ökohydrologische Modelle verwendet, die die Transport- und Reaktionsprozesse von PSM physikalisch-basiert nachbilden können. Zusätzlich besteht mit diesen Modellen die Möglichkeit, den Einfluss von Minderungsmaßnahmen auf den PSM-Austrag abzuschätzen. Für die hier vorgestellte Studie wurden die Modelle ZIN-AgriTra und SWAT ausgewählt, die auf ein kleines, landwirtschaftlich geprägtes Einzugsgebiet im Südosten Niedersachsens angewendet wurden. Im Rahmen dieses Beitrags werden die Simulationsergebnisse vorgestellt und Unterschiede, die sich aus den unterschiedlichen Modellierungsansätzen ergeben, diskutiert.

2. Material und Methoden

2.1 Untersuchungsgebiet

Für die Modellstudie wurde das Einzugsgebiet des Lahbachs (ca. 5,3 km^2) ausgewählt, das im Südosten Niedersachsens am Rand eines kleinen Höhenzuges (Elm) liegt (Abbildung 1). Das Gebiet weist Geländehöhen zwischen 125 und 200 müNN und, aufgrund der Lage am Rand des Elms, teils Hangneigungen über 10% auf. Das Einzugsgebiet des Lahbachs ist stark landwirtschaftlich geprägt. Auf ca. 78% der Fläche wird Ackerbau betrieben. Zu den Hauptanbaufrüchten zählen Winterweizen, Zuckerrüben und Wintergerste. Ca. 9% der Fläche wird durch Siedlungsgebiete bedeckt, deren versiegelte Flächen bei Niederschlag in den Lahbach entwässern. Als Bodentypen sind Pseudogley und Parabraunerde im Einzugsgebiet vorherrschend. Aufgrund des Einflusses von Staunässe sind die landwirtschaftlichen Flächen überwiegend mit Drainagen versehen. Der Oberboden ist vorwiegend schluffig, weshalb die Flächen im Einzugsgebiet ein erhöhtes Risiko für Oberflächenabfluss und Erosion aufweisen (Schwenkel et al., 2021). Dies begünstigt auch einen Eintrag von PSM in angrenzende Gewässer.

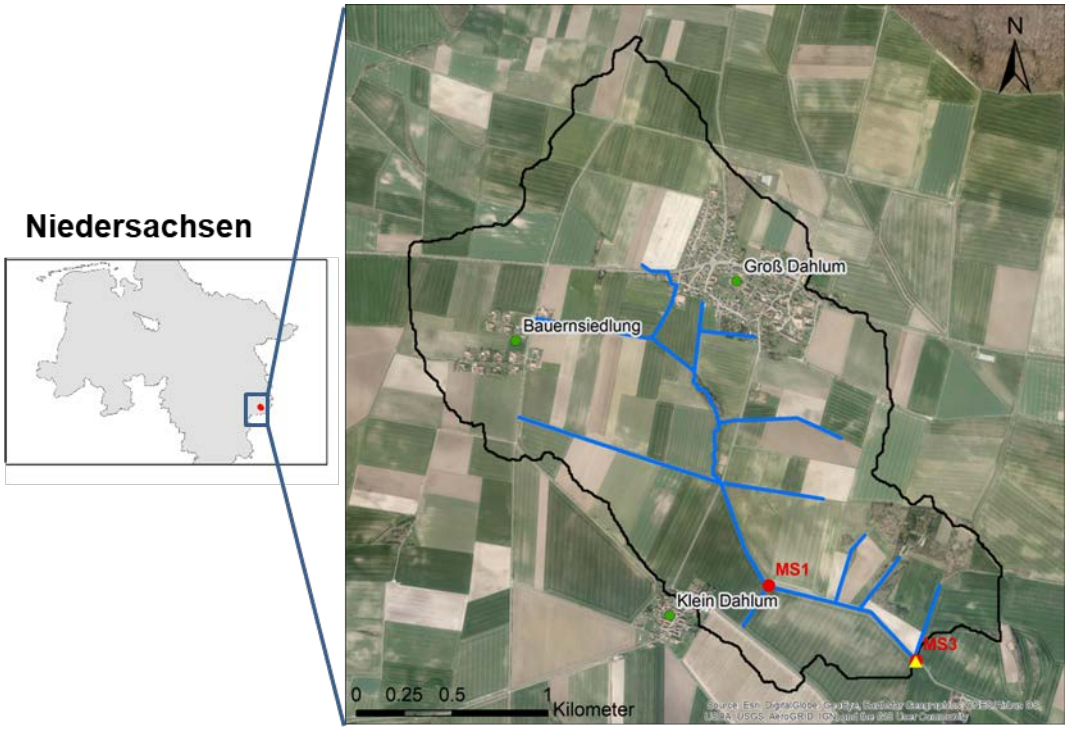


Abb. 1: Einzugsgebiet des Lahbachs (rot: Messstellen im Gewässer, gelb: Niederschlagsstation).

2.2 Datenerhebung

Zur Kalibrierung der Modelle wurde im Einzugsgebiet des Lahbachs von Oktober 2019 bis April 2021 eine umfangreiche Monitoringkampagne durchgeführt. Der Niederschlag wurde über eine autarke Niederschlagsstation, die am Auslass des Einzugsgebietes installiert wurde, minütlich aufgezeichnet (Abbildung 1). Die kontinuierliche Wasserstandregistrierung an den Messstellen MS1 und MS3 über Wasserstandslogger erfolgte in einem Zeitschritt von 10 Minuten. Durch wiederholte Messungen des Abflusses unter variablen hydrologischen Bedingungen konnte für jede Messstelle eine Abflusskurve erstellt werden.

Die Entnahme von Wasserproben erfolgte im Frühjahr und Herbst 2020 ereignisbasiert mit automatischen Probenehmern an den Stellen MS1 und MS3. Ausgelöst wurde die Probenahme über einen Schwimmer, der bei steigendem Wasserstand ein Signal an den Probenehmer sendete. Die Proben wurden anschließend abgeholt und in einem externen Labor auf ihre PSM-Konzentrationen analysiert. Hierbei wurden unter anderem die Wirkstoffe Metamitron und Ethofumesat, die im Zuckerrübenanbau verwendet werden, sowie die Wirkstoffe Flufenacet und Diflufenican, die im Winterweizenanbau verwendet werden, analysiert. Auf die genannten Wirkstoffe soll in diesem Beitrag der Fokus liegen.

2.3 Modellbeschreibung

Zur Modellierung des Wasser- und Stofftransports im Einzugsgebiet wurden die zwei ökohydrologischen Modelle ZIN-AgriTra und SWAT verwendet, die sich insbesondere in ihrer räumlichen Diskretisierung unterscheiden.

ZIN-AgriTra (Gaßmann, 2013) ist ein physikalisch basiertes, distributives Modell, das die Transport- und Reaktionsprozesse von Pflanzenschutzmitteln zeitlich und räumlich hoch aufgelöst auf Basis von Rasterzellen berechnet. Es wurde speziell für die Berechnung der Verlagerung von PSM entwickelt und ermöglicht auch eine Betrachtung der beim Abbau entstehenden Transformationsprodukte (TP). Der Abbau der PSM und TP wird unter Berücksichtigung der Bodentemperatur, -feuchte und –tiefe ermittelt. Die Sorption erfolgt kinetisch und wird über eine lineare, Freundlich- oder Langmuir-Isotherme in Abhängigkeit des organischen Kohlenstoffgehalts im Boden berechnet. Aufgrund der hohen Rechenzeit wird das Modell bisher vorwiegend für die Modellierung sehr kleiner Einzugsgebiete auf der Mikroskala verwendet.

SWAT (Neitsch et al., 2011) ist ein semi-distributives Modell, das auf Hydrotopen als kleinste Berechnungseinheiten basiert und hauptsächlich auf der Meso- bis Makroskala angewandt wird. Transport- und Reaktionsprozesse von PSM werden im Vergleich zu ZIN-AgriTra mit vereinfachten Prozessroutinen und in geringerer zeitlicher Auflösung berechnet. Für die Modellierung des Abbaus wird eine konstante Abbaurate für jeden Wirkstoff verwendet. Die Sorption erfolgt unmittelbar und wird über eine lineare Sorptionsisotherme ebenfalls in Abhängigkeit des organischen Kohlenstoffgehalts im Boden abgebildet. Vorteil des Modells ist der deutlich geringere Rechenaufwand, der es ermöglicht, dass Modell auch auf größerer Skala anzuwenden. Generell ist SWAT auf Langzeitsimulationen ausgelegt und für Berechnungen im Tageszeitschritt konzipiert, allerdings sind mittlerweile auch Berechnungen im Stundenzeitschritt möglich. Hierfür wurden bereits einige Routinen zur Beschreibung zeitlich sehr dynamischer Prozesse wie die Modellierung von Oberflächenabfluss, der Erosion auf den Landflächen und des Wellenablaufs im Gewässer angepasst (Jeong et al., 2010, 2011). Prozesse die den PSM-Transport in der Landschaft betreffen, werden allerdings in SWAT 2012 (rev664) nur im täglichen Zeitschritt berechnet.

2.4 Modellaufbau und -kalibrierung

Zum Aufbau beider Modelle wurden umfangreiche Daten zur räumlichen Beschreibung des Einzugsgebietes, meteorologische Zeitreihen sowie Daten zu den berücksichtigten PSM und TP benötigt. Eine Übersicht und Beschreibung der Eingangsdaten befindet sich in Tabelle 1.

Im Modell ZIN-AgriTra wurde für die Diskretisierung des Einzugsgebiets eine Rasterzellengröße von 20 x 20 m verwendet. Aufgrund seines semi-distributiven Charakters erfolgte in SWAT die räumliche Diskretisierung in 36 Teileinzugsgebiete, die in 742 Hydrotopen untergliedert wurden. Zur Simulation wurde in ZIN-AgriTra ein Zeitschritt von 30 min bzw. in SWAT von 1 h verwendet.

Tab. 1: Übersicht über die verwendeten Daten zum Aufbau der Modelle.

		Beschreibung und Herkunft der Daten
Räumliche Daten	Topographie	Digitales Geländemodell des Landes Niedersachsens, Auflösung 5 x 5 m
	Boden	Bodenübersichtskarte mit dem Maßstab 1:50 000 (BÜK50) (LBEG)
	Landnutzung	Schlagbezogene Anbaukulturen für das Jahr 2020 (LEA-Portal Land Niedersachsen), Ergänzung um Wald- und Siedlungsflächen
Meteorologische Daten	Niederschlag	Projekteigene Niederschlagsstation am Lahbach
	Weitere Parameter	Temperatur, relative Feuchte (Station Huy-Pabstorf, DWD) Windgeschwindigkeit, Solarstrahlung (Station Braunschweig, DWD)
Pflanzenschutzmittel	Eigenschaften	Sorptionskoeffizienten, Halbwertszeiten, etc. über die Pesticide Properties Database (PPDB)
	Applikationstermine und -mengen	Empfehlungen der Landwirtschaftskammer Niedersachsen, zusätzliche Abstimmung mit beteiligtem Landwirt

Der Kalibrierungs- bzw. Validierungszeitraum reichte für beide Modelle von Oktober 2019 bis April 2021. Zusätzlich wurde in beiden Modellen eine Initialisierungsphase berücksichtigt, um die internen Wasserflüsse und -speicher in ein Gleichgewicht zu bringen. Die Kalibrierung des Wasserhaushalts erfolgte in beiden Modellen hauptsächlich über einen Vergleich zwischen simulierten und gemessenen Abflüssen, die im Rahmen der Monitoringkampagne erfasst wurden. Neben einem visuellen Vergleich wurden auch ausgewählte Gütemaße wie der NSE, der mNSE und der PBIAS in die Bewertung der Kalibrierung einbezogen. Zusätzlich wurden zur Plausibilisierung der Modelle Daten der gebietsübergreifenden Evapotranspiration sowie der Bodenfeuchte in ausgewählten Rasterzellen bzw. Hydrotopen hinzugezogen. Hierzu standen Vergleichsdaten des DWD zur Verfügung, die mit dem agrarmeteorologischen Modell AMBAV berechnet wurden.

2.5 Erweiterung des Simulationszeitraums (Langzeitsimulation)

Aufgrund des kurzen Kalibrierungszeitraums, der zudem noch durch lange Trockenperioden gekennzeichnet war, wurde der Simulationszeitraum zur Abschätzung der Wirkung von Minderungsmaßnahmen auf den Zeitraum von Januar 2005 bis April 2021 ausgeweitet. Hierfür wurde die Niederschlagszeitreihe um Daten der Station Huy-Pabstorf (DWD) ergänzt, die ca. 20 km südöstlich des Einzugsgebietes liegt. Durch den verlängerten Simulationszeitraum können unterschiedliche meteorologische und somit auch hydrologische Bedingungen (u.a. infolge von Starkregen auftretender Oberflächenabfluss) berücksichtigt werden. Weiterhin

können sich realistische Hintergrundkonzentrationen für PSM und Transformationsprodukte im Boden einstellen, welche die Aussagekraft der Modellergebnisse erhöhen. Die Langzeitsimulationen dienen als Referenzszenarien und werden als Vergleichssimulationen zur Bestimmung der Minderungswirkung von Randstreifen in den jeweiligen Modellen verwendet.

2.6 Berücksichtigung von Minderungsmaßnahmen (Randstreifen)

Aufgrund der unterschiedlichen räumlichen Diskretisierung variieren die modellinterne Implementierung und die Berechnung der Minderungswirkung von Randstreifen zwischen den beiden Modellen. Mit ZIN-AgriTra können Randstreifen direkt an Gräben und Gewässern platziert werden. Hierzu sind die Landnutzungs- und Bodeneigenschaften der ausgewählten Rasterzellen entsprechend anzupassen. Der reaktive Transport von gelöst und sorbiert vorliegenden PSM durch den Randstreifen wird somit räumlich und zeitlich hochaufgelöst physikalisch-basiert berechnet. Die Breite des Randstreifens kann unter Berücksichtigung der Rastergröße, die für das Einzugsgebiet des Lahbachs bei 20 m lag, variiert werden. Im Rahmen dieses Beitrags wurden zwei Szenarien in ZIN-AgriTra berücksichtigt. Im ersten Szenario wurde ein 20 m breiter Randstreifen auf beiden Seiten des Lahbachs integriert. Im zweiten Szenario wurde dieser zusätzlich auf die Gräben, die in den Lahbach entwässern, ausgeweitet.
Die Integration und Modellierung von Randstreifen erfolgt in SWAT aufgrund seines semi-distributiven Charakters auf andere Art. In SWAT wird die Einstellung der Randstreifenbreite über den Parameter VFSRATIO, der das Verhältnis zwischen Hydrotop- und Randstreifenbreite beschreibt, gesteuert. Dies hat einen großen Vorteil gegenüber der direkten Angabe einer Randstreifenbreite, da Hydrotope innerhalb eines Einzugsgebietes ganz unterschiedliche Größen aufweisen können. Der Parameter VFSRATIO wurde für die hier vorgestellten Simulationen zwischen 29 und 260 für alle Hydrotope variiert. Die Minderungswirkung von Randstreifen wird in SWAT anschließend über empirisch ermittelte Regressionsgleichungen für Runoff und Erosion bestimmt und die Ergebnisse auf die gelöst und sorbiert vorliegenden PSM übertragen (White und Arnold, 2009).

3. Ergebnisse und Diskussion

3.1 Modellkalibrierung

In Abbildung 2 sind die Ergebnisse der Abflusskalibrierung bzw. -validierung für beide Modelle für die Messstelle MS3 dargestellt. Für das Modell ZIN-AgriTra wurde der Simulationszeitraum in eine Kalibrierungs- und eine Validierungsphase aufgeteilt. In SWAT wurde der gesamte Monitoringzeitraum für die Kalibrierung verwendet, da die abflussrelevanten Prozesse im Einzugsgebiet nur mit einer ausreichend langen Datenserie in SWAT realistisch abgebildet werden konnten.
Für beide Modelle zeigt sich, dass die Dynamik des Abflusses über das Jahr hinweg gut wiedergegeben wird. In den Winter- und Frühjahrsmonaten kommt es zur Sättigung der unteren Bodenschichten und zu einem Abfluss aus den Drainagen. In den Sommermonaten ist der Bach fast vollständig ausgetrocknet, was auch in den Messdaten beobachtet werden konnte. Die Abflussspitzen kurzzeitiger Ereignisse werden durch die Modelle teilweise etwas unterschätzt, dies zeigt sich insbesondere für SWAT.

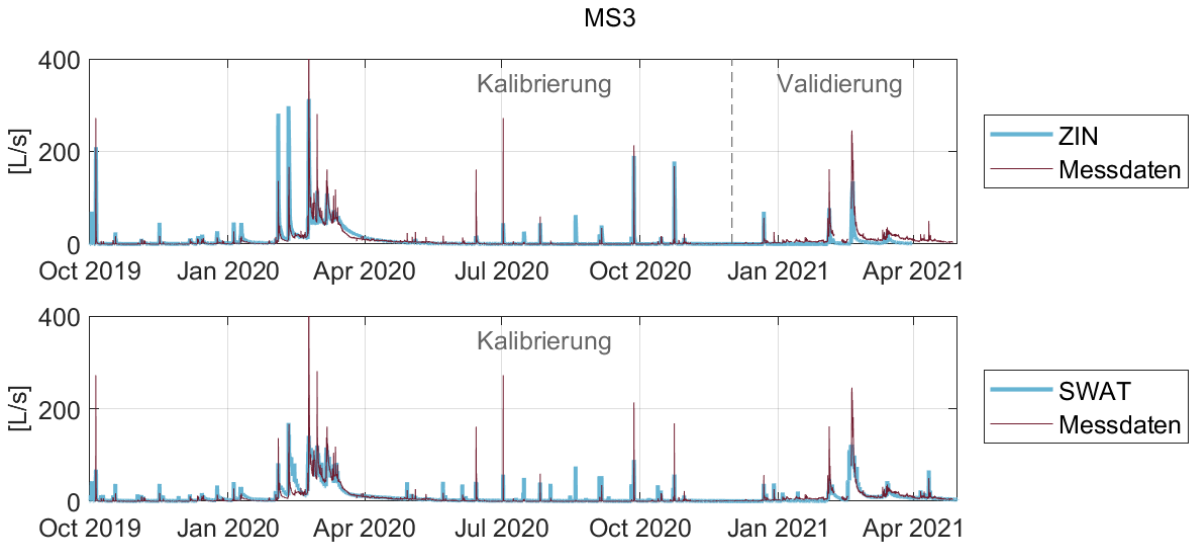


Abb. 2: Vergleich des simulierten und des gemessenen Abflusses an der Station MS3 für die Modelle ZIN-AgriTra (Δt = 30 min) und SWAT (Δt = 1 h).

Die in Tabelle 2 angegeben Gütemaße bestätigen die gute Anpassung der Modelle an die Messdaten. Der NSE liegt für die Kalibrierung bei beiden Modellen in einem Bereich von >0,6 für einen Zeitschritt von 1 h bzw. 30 min. Für ZIN-AgriTra nimmt die Güte in der Validierungsphase leicht ab (vgl. mNSE und PBIAS). Durch die außergewöhnlichen Witterungsverhältnisse (starker Schneefall Anfang 2021) wird der Abfluss durch beide Modelle in dieser Phase unterschätzt, was sich auch im PBIAS bemerkbar macht. Hier sind auch Messunsicherheiten durch das Zufrieren des Lahbachs zu berücksichtigen.

Tab. 2: Gütemaße für die Kalibrierung und Validierung des Abflusses an den Stationen MS1 und MS3 in SWAT und ZIN-AgriTra.

	SWAT (Δt = 1 h)		ZIN-AgriTra (Δt = 30 min)			
	Kalibrierung (Okt19-Apr21)		Kalibrierung (Okt19-Nov20)		Validierung (Dez20-Mar21)	
	MS1	MS3	MS1	MS3	MS1	MS3
NSE	0,68	0,70	0,67	0,63	0,51	0,72
mNSE	0,65	0,62	0,62	0,65	0,46	0,45
PBIAS [%]	22,19	-3,94	-0,70	-12,8	63,8	42,4

Bei der Kalibrierung des Sediments wurde aufgrund des Ausbleibens von signifikantem Oberflächenabfluss auf den Ackerflächen davon ausgegangen, dass sich erhöhte Schwebstoffkonzentrationen während des Monitorings ausschließlich auf Erosionsprozesse innerhalb des Gewässers zurückzuführen lassen. Die Ergebnisse zeigen, dass der Verlauf und der Wertebereich der Schwebstoff-Messungen durch beide Modelle zufriedenstellend wiedergegeben werden konnten (nicht dargestellt). Während kurzzeitiger Abflussspitzen kommt es zu einem Anstieg der Schwebstoffkonzentrationen, wie dies auch in den Messdaten beobachtet werden kann. Die Parameter, die die Erosion auf den Landflächen (Feldern) beschreiben, konnten aufgrund der fehlenden Starkregenereignisse nicht kalibriert werden.

Durch die sehr trockenen Witterungsverhältnisse und das Ausbleiben von Oberflächenabfluss während der Monitoringperiode konnten nicht ausreichend Probenahmen für die PSM-Kalibrierung durchgeführt werden. Hier musste bei der Parametrisierung der Modelle teils mit Literaturwerten gearbeitet werden. Die Ergebnisse sind daher mit Unsicherheiten behaftet, die bei der weiteren Auswertung zu berücksichtigen sind.

3.2. Langzeitsimulation

Die Ergebnisse der Langzeitsimulation von Januar 2005 bis April 2021 zeigen, dass die mittlere jährliche Wasserbilanz von beiden Modellen gut übereinstimmt. Der Niederschlag beträgt durchschnittlich 540 mm/a. Über Evapotranspiration (ZIN-AgriTra: 433 mm/a, SWAT: 440 mm/a), Abfluss (ZIN-AgriTra: 61 mm/a, SWAT: 66 m/a) und Grundwasserneubildung (ZIN-AgriTra: 44 mm/a, SWAT: 24 mm/a) verlässt das Wasser wieder das Einzugsgebiet. Obwohl eine direkte Kalibrierung des Oberflächenabflusses aufgrund fehlender Messwerte nicht möglich war, wird durch beide Modelle ein sehr ähnlicher jährlicher Mittelwert von 6 bis 7 mm/a berechnet. Bei der weiteren Aufteilung der Abflusskomponenten und der Grundwasserneubildung zeigen sich teils Abweichungen zwischen den Modellen, die sich unter anderem auf die unterschiedliche vertikale Diskretisierung zurückführen lassen. In ZIN-AgriTra gelangt der größte Teil des Wassers über Drainagen in das Gewässer. Auch in SWAT sind Drainagen der Haupteintragspfad, allerdings haben auch der laterale Abfluss über die Bodenmatrix und der Basisabfluss aus dem Grundwasser einen Anteil am gebildeten Abfluss im Gewässer.
Einen Überblick über die mit beiden Modellen berechneten mittleren jährlichen PSM-Austräge über Oberflächenabfluss, Erosion, lateralen Abfluss und Drainagen sowie die Auswaschung in das Grundwasser gibt Abbildung 3.

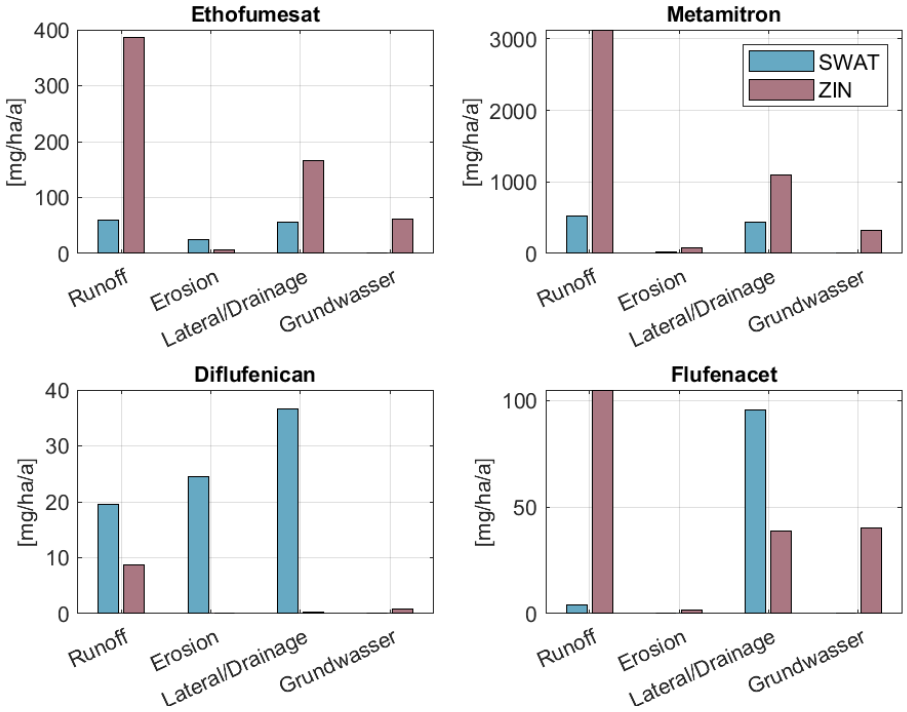


Abb. 3: Vergleich der modellierten mittleren jährlichen PSM-Austräge über die Pfade Runoff, Erosion, lateraler Abfluss/Drainagen sowie Auswaschung in das Grundwasser für die Langzeitsimulation (2005-2021).

Die Wertebereiche für die einzelnen Wirkstoffe sind proportional zu den absoluten Applikationsmengen. So wird Metamitron in den größten Mengen im Einzugsgebiet appliziert, und in beiden Modellen werden für diesen Wirkstoff die höchsten Austragsmengen ermittelt. Zwischen den Modellen lassen sich teils deutliche Unterschiede im Hinblick auf Austragsmengen und der Zuordnung zu den einzelnen Transportpfaden erkennen. Diese Unterschiede lassen sich neben der unvollständigen Kalibrierung auch auf die beschriebenen Unterschiede in der Wasserbilanz sowie auf die modellinterne Abbildung der Reaktionsprozesse von PSM zurückführen. Dies ist bei der weiteren Auswertung der Szenarienergebnisse zu berücksichtigen, da unterschiedliche Austragsmengen die Reduktionsleistung der Randstreifen beeinflussen können.

3.3. Minderungsmaßnahmen (Randstreifen)

Durch beide Modelle wird bei Berücksichtigung von Randstreifen eine Reduktion des PSM-austrags infolge von Oberflächenabfluss und Erosion prognostiziert. In SWAT liegt die Reduktionsleistung für die im Oberflächenabfluss gelöst vorliegenden PSM in Abhängigkeit des Faktors VFSRATIO zwischen 63 und 91% (Abbildung 4). Für die partikulär gebundenen PSM schwankt der Wertebereich deutlich stärker zwischen 19 und 98%. Bei der Bewertung der Ergebnisse sind der Zeitraum zwischen Applikation und Niederschlag, die Niederschlagsintensität sowie die absoluten Austragsmengen zu berücksichtigen. In ZIN-AgriTra liegt die Reduktionsleistung für im Oberflächenabfluss gelöst vorliegende PSM bei einem 20 m breiten Randstreifen ausschließlich am Lahbach zwischen 9 und 23%. Bei zusätzlicher Berücksichtigung von Randstreifen an den Entwässerungsgräben erhöht sich die Reduktionsleistung auf 16 bis 28%. Aufgrund des geringen Austrags von partikulär gebundenen PSM in ZIN-AgriTra wird hierfür keine Reduktionsleistung angegeben.

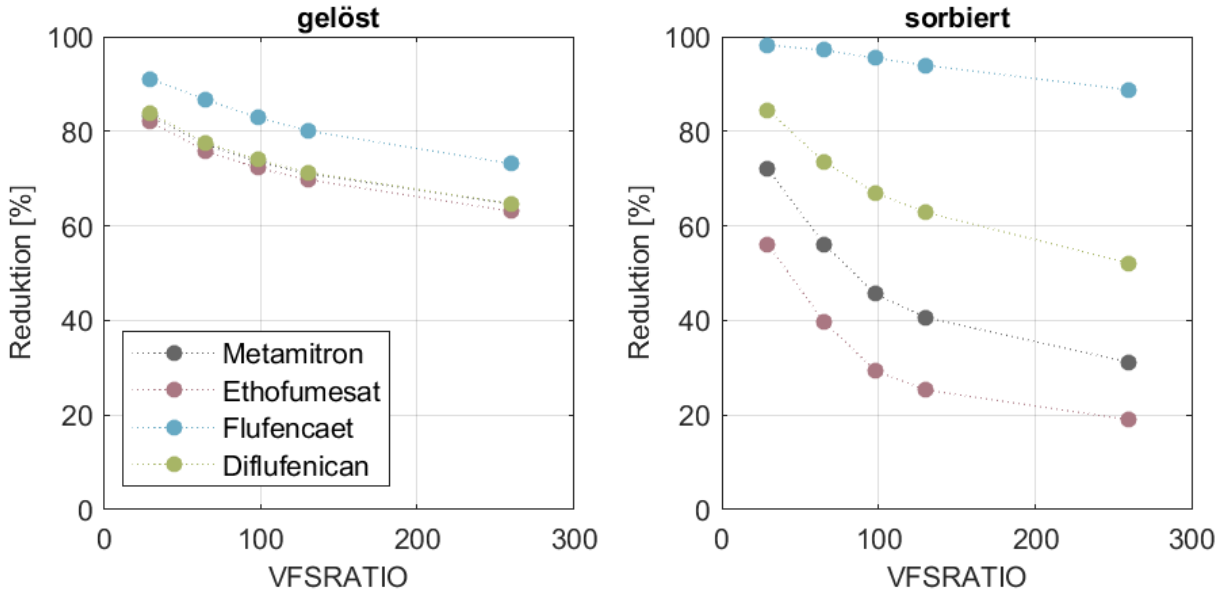


Abb. 4: Einfluss des Parameters VFSRATIO im Modell SWAT auf die Reduktion von gelöst und sorbiert vorliegenden PSM.

Bei einem Ergebnisvergleich der Szenarien beider Modelle sind die räumliche Diskretisierung sowie die unterschiedlichen Ansätze zur Implementierung von Randstreifen zu berücksichtigen. Es zeigt sich generell, dass SWAT für die im Oberflächenabfluss gelöst vorliegenden PSM deutlich höhere Reduktionen berechnet als ZIN-AgriTra. Ein Grund liegt wahrscheinlich in den höheren berechneten absoluten Austragsmengen durch Oberflächenabfluss in ZIN-AgriTra (Abbildung 3). Im Allgemeinen sinkt die Reduktionsleistung eines Randstreifens mit zunehmenden Wasser- bzw. Sedimenteintrag, was auch in den empirischen Gleichungen von SWAT berücksichtigt wird (White und Arnold, 2009). Ein weiterer Grund liegt möglicherweise in der unterschiedlichen Abbildung des Transports und Rückhalts von PSM innerhalb der Randstreifen in den beiden Modellen. In ZIN-AgriTra wird der Transport von sorbiert und gelöst vorliegenden PSM durch den Randstreifen zeitlich und räumlich hochaufgelöst physikalisch-basiert anhand der vorliegenden Topographie berechnet. In SWAT erfolgt die Berechnung der Reduktionsleistung ausschließlich mit Hilfe empirischer Gleichungen. Hierfür wird der in einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde simulierte Oberflächenabfluss und Sedimentaustrag eines Hydrotops zunächst zu Tageswerten aufsummiert. Erst danach erfolgt die Berechnung der Reduktionsleistung. Das zeitlich sehr kurzfristige und stark dynamische Auftreten von Oberflächenabfluss wird somit nicht berücksichtigt.
Randstreifen sind in SWAT nur auf die Reduktion des Oberflächenabflusses und des Sedimentaustrags ausgerichtet. Die zurückgehaltenen PSM gehen dabei aus dem System verloren. Durch das physikalisch-basierte Modell ZIN-AgriTra können auch die nachfolgend auftretenden Transport- und Reaktionsprozesse innerhalb des Randstreifens berücksichtigt werden. So konnte innerhalb der Szenarien teilweise ein leicht erhöhter Austrag in das Grundwasser, insbesondere der Transformationsprodukte beobachtet werden. Dies verdeutlicht, dass PSM und die entstehenden TP nicht aus dem System verloren gehen, auch wenn durch Randstreifen ein direkter Eintrag über Oberflächenabfluss in angrenzende Gewässer reduziert werden kann.

4. Fazit und Ausblick

Die Ergebnisse zeigen, dass beide Modelle grundsätzlich in der Lage sind, Maßnahmen zur Reduktion des PSM-Austrags aus der Landwirtschaft nachzubilden. Allerdings variiert die vorhergesagte Reduktionsleistung zwischen den Modellen teils deutlich. Hierbei ist unter anderem die unvollständige Kalibrierung des PSM-Austrags in den Modellen zu berücksichtigen. Für die weitere Kalibrierung und Validierung der Modelle wäre daher ein längerer Monitoringzeitraum wesentlich, in dem insbesondere auch mehrere Starkregenereignisse enthalten sind, da diese den Austrag von PSM über Oberflächenabfluss und Erosion maßgeblich steuern. Weiterhin spielen die unterschiedliche räumliche und zeitliche Abbildung der Transport- und Reaktionsprozesse und die momentan verwendeten Verfahren zur Berechnung der Reduktionsleistung in den Modellen eine große Rolle.
In ZIN-AgriTra erfolgt bereits eine detaillierte Modellierung der Transport- und Reaktionsprozesse von Pflanzenschutzmitteln und ihren Transformationsprodukten. Die Abbildung dieser Prozesse geht allerdings mit einem höheren Parametrisierungsgrad einher. Nicht für alle Parameter standen Daten aus Laborstudien zur Verfügung, so dass hier oftmals Annahmen getroffen werden mussten. Die Parameterunsicherheiten könnten zukünftig durch zusätzliche

Laborstudien reduziert werden. Weiterhin stößt der distributive Ansatz bei der Modellierung von größeren Einzugsgebieten bzw. bei kleinerer räumlicher Auflösung, um beispielsweise auch Randstreifen geringerer Breite zu berücksichtigen, an seine Grenzen. Zur Erhöhung der Rechenkapazität, u.a. auch für Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalysen, ist die Auslagerung der Simulationen auf einen Clusterrechner ein wichtiger Schritt.
Im Vergleich zu ZIN-AgriTra erfolgt in SWAT die Modellierung der Transport- und Reaktionsprozesse von PSM insbesondere auf den Landflächen in vereinfachter Form und nur im täglichen Zeitschritt. Allerdings ist insbesondere der Austrag von PSM über Oberflächenabfluss und Erosionsprozesse zeitlich stark dynamisch. Daher sollten in Zukunft die Prozessroutinen zur Simulation des PSM-Transports in SWAT an einen stündlichen Zeitschritt angepasst werden. Nur so können auch Konzentrationen im Gewässer, die für die Risikobewertung bezogen auf das aquatische Ökosystem maßgeblich sind, realistisch berechnet werden. Auch die Reaktionsprozesse (Abbau, Sorption/Desorption) von PSM im Boden werden in SWAT bisher nur vereinfacht dargestellt. Insbesondere der Abbau sollte in der Zukunft in Abhängigkeit der Temperatur zeitlich dynamisch berechnet werden.
Abschließend wird empfohlen das Monitoring und die Modellierung von Pflanzenschutzmitteln in der Zukunft weiter voranzutreiben, um sowohl das Prozessverständnis als auch die Prognosefähigkeit weiter zu steigern.

Danksagung
Wir danken dem Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit für die finanzielle Förderung des Forschungsprojektes „Grundlagen der Risikominderungsmaßnahmen zur Abschwemmung von Pflanzenschutzmitteln“. Ein weiterer Dank geht an Herrn Prof. Matthias Gaßmann für die Bereitstellung des Modells ZIN-AgriTra.

Literatur
Gaßmann, M., 2013. Environmental fate modelling of agrochemicals and their transformation products at catchment scale, Dissertation, Lüneburg

Jeong, J., Kannan, N., Arnold, J., Glick, R., Gosselink, L., Srinivasan, R., 2010. Development and Integration of Sub-hourly Rainfall–Runoff Modeling Capability Within a Watershed Model, Water Resources Management, 24 (15), 4505-4527

Jeong, J., Kannan, N., Arnold, J. G., Glick, R., Gosselink, L., Srinivasan, R., Harmel, R. D., 2011. Development of Sub-Daily Erosion and Sediment Transport Algorithms for SWAT, Transactions of the ASABE, 54 (5), 1685-1691

Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, R., Williams, R. J., 2011. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009, Texas Water Resources Institute Technical Report No. 406

Schwenkel, J., Zeunert, S., Le, H., Müller-Thomy, H., Schöniger, M., and Meon, G. (2021). Comparison of the ecohydrological models AnnAGNPS and ZIN-AgriTra for a small agricultural catchment, EGU General Assembly 2021, EGU21-12233

White, M. J., Arnold, J. G., 2009. Development of a simplistic vegetative filter strip model for sediment and nutrient retention at the field scale, Hydrological Processes, 23 (11), 1602-1616

Bedeutung der Flusseintiefungen für Auenreaktivierungen – eine nährstoffbasierte Perspektive

Stephanie Natho, Martin Tschikof, Thomas Hein

Zusammenfassung

Die Jahrhunderte lange Praxis des Flussausbaus durch Begradigungen, Buhnen, Eindeichungen und Stauhaltungen hat an vielen Flüssen neben Auenverlust und Verschlechterung des Auenzustands zu einer deutlichen Flusseintiefung durch Sohlerosion geführt. Diese wird in der Literatur mit 1 bis zu 4m an Flüssen wie Elbe, Rhein und Donau seit Beginn der Regulierungsarbeiten beziffert – mit katastrophalen Folgen für die Fluss-Auen-Konnektivität. Welche Bedeutung eine Auenreaktivierung unter sohlerodierenden Gesichtspunkten für den stofflichen Austausch für Stickstoff und Phosphor haben kann, beleuchtet diese Studie mit einem Beispiel an einem frei fließenden Abschnitt der österreichischen Donau unterhalb von Wien, in dem Gewässervernetzungen auf unterschiedliche Wasserspiegellagen von Niedrigwasser bis erhöhtes Mittelwasser für verschiedene Seitenarme durchgeführt wurden.

Mittels jeweils eines statistischen und eines semi-empirischen Modells wird untersucht, welchen Beitrag die Nährstoffretention in wieder angebundenen Flussauen unter verschiedenen hydrologischen Szenarien (trocken, mittel, nass) hat. Weiters werden eine weitere Sohleintiefung von ca. 1,4 cm pro Jahr bis 2050 sowie der Stand an Renaturierungen an den sieben Nebenarmsystemen bis zum Jahr 2015 angenommen.

Die andauernde Tiefenerosion führt zu einer Reduktion von Überflutungstagen für alle Nebenarmsysteme. Die Modellergebnisse zeigen, dass zukünftig deutlich weniger Nährstoffe in den Auen zurückgehalten würden. Neben Maßnahmen zur Reduktion der Tiefenerosion wie Substratzugabe im Fluss wie an Rhein, Isar und Donau bereits geschehen, können durch einen Anbindungsstart der Nebenarme bereits bei (unterschiedlichen) geringen Abflüssen eine bessere Überflutungssituation, eine höhere Prozessdiversität und somit eine höhere Nährstoffretention in diesen Nebenarmsystemen geschaffen werden.

1. Einleitung

Flüsse und ihre angrenzenden Auen sind Grundlage für menschliches Leben, für Handel und Landwirtschaft, aber auch von immenser Bedeutung für die Biodiversität – und trotzdem gehören sie zu den am meisten gefährdeten Ökosystemen weltweit (Tockner et al., 2008). Neben flussbaulichen Maßnahmen ist ganz besonders die Tiefenerosion der Flüsse durch in Staudämmen zurückgehaltenes Substrat (BAW and BfG, 2016) sowie erhöhter Fließgeschwindigkeiten in Folge verkürzter Fluss-läufe und Buhnen für die Entkoppelung zwischen Fluss und Aue verantwortlich. Diese Tiefenerosion wird an verschiedenen Mitteleuropäischen Flüssen mit 1m (mittlere Elbe), 2m (Rhein) und bis zu 4m (West-Donau) im Vergleich angegeben (Dister, 1980; Gabriel et al., 2011; Skublics and Rutschmann, 2015). Auch an der österreichischen Donau wurde von Tiefenerosion berichtet (Klasz, 2002; Schiemer et al., 1999). Die Auswirkungen der fehlenden Fluss-Aue-Konnektivität sind auch für den Stoffhaushalt bedeutend. Natürlicherweise halten Auen Nährstoffe während ihrer Überschwemmung zurück, gelten als Nieren der Landschaft (Mitsch, 1995) und verbessern die Wasserqualität der Flüsse (Schulz-Zunkel et al., 2012; Vidon et al., 2010), da die Nährstoffe wie Stickstoff (N) und Phosphor (P) teilweise sogar permanent aus dem System entfernt werden. Zu nennen sind die Denitrifikation als permanente N-Entfernung (Kaden et al., 2021) oder Sedimentation von N und P als

temporärer Rückhalt (Noe et al., 2019). Bleiben allerdings regelmäßige Überflutungen aus, sinkt der Beitrag der Nährstoffretention von Auen. Ziel dieser Arbeit ist es, die Folgen der Tiefenerosion für den Nährstoffrückhalt in Auen anhand zwei unterschiedlicher Modelle aufzuzeigen, da sich diese Modelle bzgl. Skala und Prozessgenauigkeit ergänzen.

2. Methoden & Untersuchungsbereich

Untersuchungsgebiet ist die 36km freifließende Donau im Nationalpark Donau-Auen östlich von Wien mit seinen Seitenarmen. Abfluss- (https://ehyd.gv.at/) und Gütedaten (https://wasser.umweltbundesamt.at/h2odb/) wurden von offiziellen Messstationen heruntergeladen sowie die Renaturierungsszenarien und Tiefenerosionsschätzungen der „Österreichischen Wasserstraßen-Gesellschaft“ viadonau (http://www.viadonau.org) verwendet (Details in Natho et al. (2020)).

Die Modellierung der Nährstoffretention in wieder angebundenen Nebenarmen erfolgte unter verschiedenen hydrologischen Szenarien (trocken, mittel, nass) sowie im Vergleich zum Ist-Zustand bezogen auf den Durchführungsgrad der Seitenarmanschlüsse durch Renaturierungsmaßnahmen (vgl. Natho et al. (2020). Verschiedene frei verfügbare GIS-Daten zur Landnutzung, Hochwassergefahr, Nationalparkgrenzen.

Es wurden zwei unterschiedliche Modelle angewendet. Während das statistische Modell auf realen knapp 180 paarweisen Nährstoffkonzentrationsmessungen in verschieden angebundenen Nebenarmen basiert, koppelt das semi-empirische Modell ein Retentionsmodell (Venohr et al., 2011) mit empirisch abgeleiteten Modellen zur Bestimmung der überfluteten Fläche sowie die einströmende Nährstofffrachten jeweils abhängig von tatsächlichen Abflüssen (Natho and Venohr, 2012).

Die Sohlerosion wird in beiden Modellen in dem Maße berücksichtigt, dass ein Anschluss der Seitenarme dann erst bei höheren Abflüssen als zum Ist-Stand stattfindet, da die Sohleintiefung bis 2050 mit 1,4cm/Jahr und damit insgesamt mit ca. 50cm angenommen wird. Hierfür wurde das zugrundeliegende hydraulische Modell (HEC-RAS 1D) angepasst. Der Stand der Renaturierungen (IST-Zustand) entspricht dem Stand von 2015.

Für das statistische Modell wird angenommen, dass die Retention abhängig von Abfluss, Wassertiefe und Flächen während Anbindungs- und Nicht-Anbindungsphasen stattfindet:

$$\text{total TP retention (dc)} = \frac{\frac{dc}{m} \cdot cin}{\left(\frac{dc}{m} + \left(cin - \frac{dc}{m}\right)\right) \cdot e^{-a \cdot (L^{-1})}}$$

dc = Konzentrationsdifferenz zwischen Ein- und Auslass (mg m^{-3})
dc/m = System-spezifische Retentionsrate (mg m^{-3} m^{-1})
cin = Einlasskonzentration (mg m^{-3})
a = Konzentrationsabhängige Retentionsrate (abh. von Anbindungsklasse)
L = Länge des Seitenarmes (m)

Für die Nitratretention konnte kein signifikanter Zusammenhang festgestellt werden. Daher wurden mittlere Retentionsraten für den angebundenen (9×10^{-7} g m^{-3} m^{-1}, n = 54) und entkoppelten Zustand (718×10^{-5} g m^{-3} d^{-1}, n = 125) aus den Messwerten abgeleitet.

Dem semi-empirisches Modell liegt die Annahme zugrunde, dass die Retention nur während Anbindungsphasen stattfindet.

$$Nret\% = \left(\frac{1}{\left(1+(a \cdot a_1 \cdot R) \cdot e^{b \cdot T} \cdot HL^{-1}\right)} \right) \cdot 100$$

$$Pret\% = \left(\frac{1}{\left(1+c \cdot HL^{-1}\right)} \right) \cdot 100$$

R = Globalstrahlung [W m^{-2}]
T = Temperatur [°C]
HL = Hydraulische Last [m yr^{-1}]
a, a_1, b, c = Nährstoff spezifische Retentionskoeffizienten

3. Ergebnis & Diskussion

3.1 Vergleich der Modelle

Die Modellergebnisse liegen in den Bereichen der berichteten Nährstoffretention aus anderen Studien (Natho et al., 2020). Die Modelle zeigen tendenziell ähnliche Verläufe für die monatliche flächenspezifische Retention (Abbildung 1). Unterschiede zeigen sich bei genauerem Hinsehen durch die unterschiedlichen Modellannahmen. Während das statistische Modell auch eine Retention an Nicht-Anbindungstagen durch Restwasser wiedergeben kann, fehlt dies im semi-empirischen Modell. Allerdings ist der Beitrag dieser Restwasserretention so gering, dass er in der Retentionssumme aller Systeme nicht erkennbar ist. Dafür berücksichtigt das semi-empirische Modell den aktuellen Abfluss zur Berechnung der hydraulischen Last und damit ein Surrogatparameter der Aufenthaltszeit (Venohr et al., 2011). Als Resultat sind bei sehr hohen Abflüssen die Retentionswerte nicht unbedingt höher, da in bestimmten Fällen die hydraulische Last so hoch und die Kontaktzeit so gering ist, dass der flächenspezifische Wert des semi-empirischen Modells unter dem des statistischen Modelles liegt, bzw. dann bei geringerem Hochwasser über dem des statistischen Modells liegt, da die höhere Kontaktzeit für die Retention vorteilhaft ist.

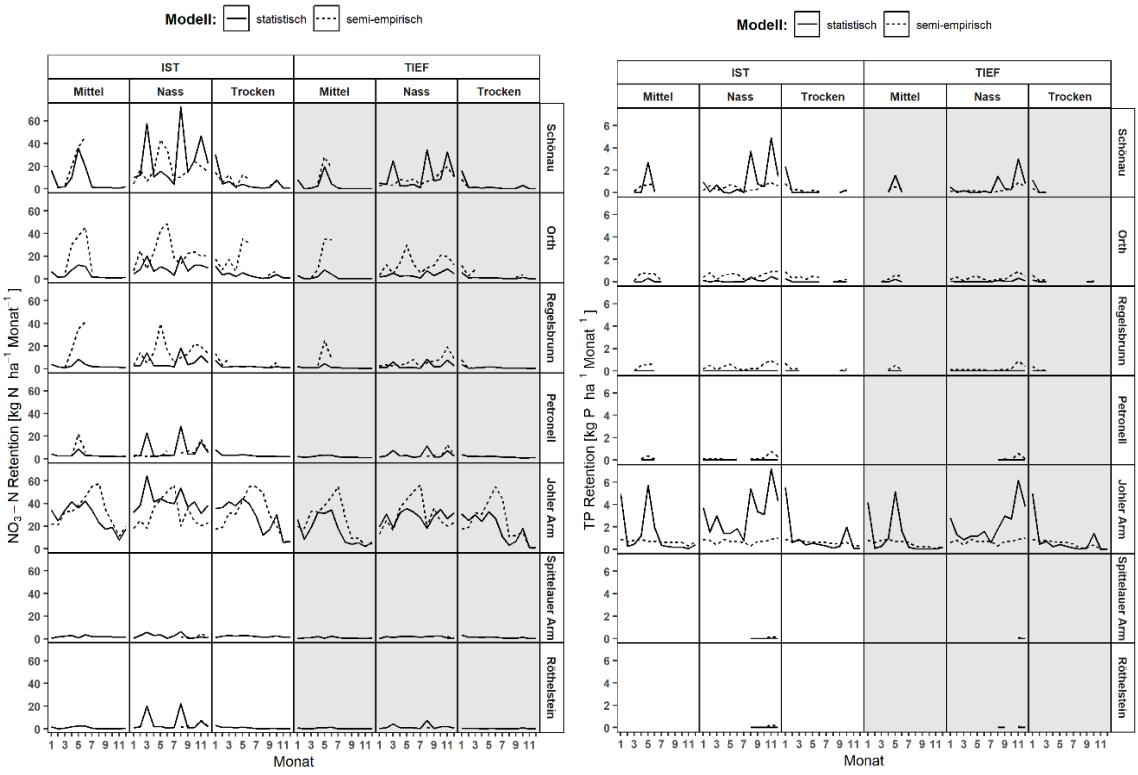


Abb. 1: monatliche flächenspezifische Retention des statistische und semi-empirischen Modells für die 7 Seitenarmsysteme der Donau für den Ist-Zustand (IST) und das Szenario unter Berücksichtigung der Tiefenerosion (TIEF) für NO3-N (links) und TP (rechts).

3.2 Auswirkung der Tiefenerosion auf die Nährstoffretention in renaturierten Seitenarmen der Donau

Anhand der bislang angeschlossenen Seitenarme ist deutlich zu sehen, dass die fortschreitende Tiefenerosion zu einer Reduktion der Überflutungen führt (Tabelle 1). Während der renaturierte Johler Arm im IST-Zustand immer angeschlossen ist, führt die Tiefenerosion dazu, dass ca. 200 m³/s mehr für einen Anschluss gebraucht werden, was dann an nur noch 357 Tagen in einem nassen Jahr erreicht wird. In einem trockenen Jahr hingegen sinkt die Anbindung auf nur 242 Tage (anstelle von 311 Tagen). Der bei höchsten Wasserständen angeschlossene Spittelauer Arm hingegen würde in einem trockenen Jahr unter den Tiefenerosionsbedingungen sogar gar nicht angeschlossen sein und damit keinen Beitrag zur Nährstoffretention leisten können.

Die Auswirkung der ausbleibenden Überflutungen auf die Nährstoffretention zeigen auch Abbildung 2a und 2b: es werden weniger Nährstoffe zurückgehalten. Der Grund hierfür ist, dass bspw. biogeochemische Prozesse des Nährstoffrückhaltes wie die Denitrifikation bei durch Überflutung induzierten Sauerstoffmangel und Nährstoffnachschub in überfluteten Auen stattfindet und diese seltener werden. Hierzu tragen nicht nur gut an den Fluss angebundene Nebengewässer an sich bei, sondern auch flächige Bereiche wie insbesondere Feuchtgebiete. Insgesamt beträgt die Differenz 6-28t NO_3-N und 0,1-0,6t TP, welche aufgrund der Eintiefung nicht in den Nebenarmen zurückgehalten und weiter flussabwärts transportiert werden.

Tab. 1: Anbindungsstart der 7 Seitenarmsystem sowie Anzahl der Anbindungstage für die Szenarien IST (Ist-Zustand) und TIEF (Eintiefung). Der mittlere Durchfluss beträgt 1930 m^3s^{-1}.

Seitenarmsystem	Anbindungsstart bei Abfluss der Donau [m^3s^{-1}]		Anzahl der Anbindungstage nass/trocken/mittel [d a^{-1}]	
	IST	TIEF	IST	TIEF
Schönau	1994	2427	235/72/99	133/21/50
Orth	1758	2161	289/125/121	190/42/74
Regelsbrunn	2100	2563	208/52/88	113/20/36
Petronell	2689	3207	98/16/30	56/11/13
Johler Arm	917	1181	365/311/339	357/242/249
Spittelauer Arm	3618	4143	33/7/5	23/0/3
Röthelstein	3518	4035	41/8/7	24/02/4

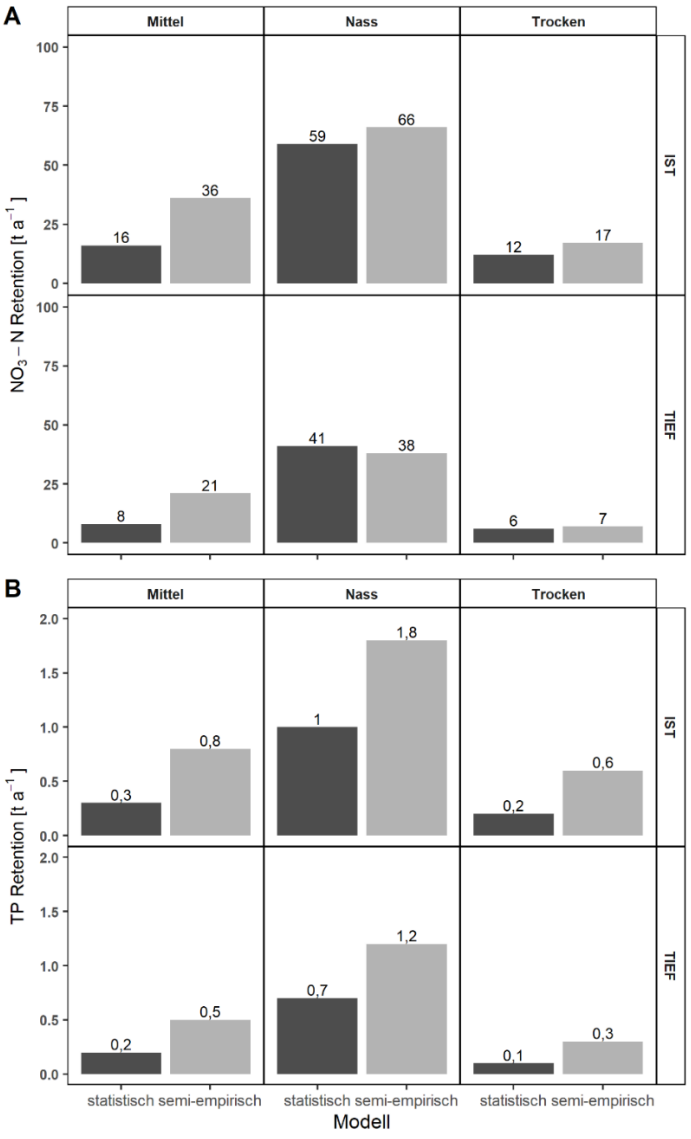


Abb. 2: Vergleich NO3-N (2a) und P Retention (2b) als Summe aller Seitenarme für hydrologische Szenarien

Schon jetzt gibt es Seitenarme mit sehr steilen Uferböschungen (wie beim gut durchströmten Johler Arm), die bei geringen Hochwässern nicht überflutet werden können. Aus Sicht des Nährstoffrückhalts wäre es hilfreich, bei Renaturierungsmaßnahmen Eigendynamik fördernde Maßnahmen zu initiieren, die steile Uferböschungen (wie auch natürlicherweise bei Hochwassern geschehen) zu flachen Winkeln erodieren und damit die flächenhafte Anbindung fördern.

Maßnahmen zur Reduktion der Tiefenerosion durch massive Substratzugabe im Fluss wie an Rhein, Mosel, Isar und Donau bereits teilweise seit Jahrzehnten geschehen (BAW and BfG, 2016; BMNT, 2018), können durch einen Anbindungsstart der Nebenarme bereits bei (unterschiedlichen) geringen Abflüssen eine bessere Überflutungssituation und eine höhere Prozessdiversität schaffen. Die Anbindung der anthropogen wenig überprägten Seitenarme der Donau erhöht den Eintrag von Stoffen durch den Fluss und deren Umsetzung, erlaubt in vielen Bereichen aber weiterhin interne Prozesse wie in abgekoppelten Auengewässern (z.B. Reckendorfer et al., 2013).

Literatur

BAW, BfG, 2016. Sedimentdurchgängigkeit der Bundeswasserstraßen im Binnenbereich. Metastudie. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG).

BMNT, 2018. Sohlentwicklung in der freien Fliessstrecke unterstrom Kraftwerk Freudenau. Arbeitsgruppe „Sohlentwicklung in der freien Fließstrecke unterstrom KW Freudenau“ Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus: Endbericht, Wien.

Dister, E., 1980. Geobotanische Untersuchungen in der hessischen Rheinaue als Grundlage für die Naturschutzarbeit, PhD Thesis. Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät Georg August-Universität Göttingen.

Gabriel, T., Kühne, E., Faulhaber, P., Promny, M., Horchler, P., 2011. Sohlenstabilisierung und Erosionseindämmung am Beispiel der Elbe. Wasserwirtschaft, 101(6): 27-32.

Kaden, U.S. et al., 2021. Soil Characteristics and Hydromorphological Patterns Control Denitrification at the Floodplain Scale. Frontiers in Earth Science, 9: 626.

Klasz, G., 2002. Die flussmorphologische Situation der Donau in Hinblick auf Sohlerosion, Technische Universität Wien, Vienna.

Mitsch, W.J., 1995. Restoration of our lakes and rivers with wetlands — An important application of ecological engineering. Water Science and Technology, 31(8): 167-177. DOI:http://dx.doi.org/10.1016/0273-1223(95)00369-X

Natho, S., Tschikof, M., Bondar-Kunze, E., Hein, T., 2020. Modeling the Effect of Enhanced Lateral Connectivity on Nutrient Retention Capacity in Large River Floodplains: How Much Connected Floodplain Do We Need? Frontiers in Environmental Science, 8(74). DOI:10.3389/fenvs.2020.00074

Natho, S., Venohr, M., 2012. Nutrient retention in riparian floodplains on landscape scale, the necessity for a monthly retention approach. Water Science and Technology, 66(12): 2800-2807.

Noe, G.B. et al., 2019. The effects of restored hydrologic connectivity on floodplain trapping vs. release of phosphorus, nitrogen, and sediment along the Pocomoke River, Maryland USA. Ecological Engineering, 138: 334-352. DOI:https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.08.002

Reckendorfer, W., Funk, A., Gschöpf, C., Hein, T., Schiemer, F., 2013. Aquatic ecosystem functions of an isolated floodplain and their implications for flood retention and management. Journal of Applied Ecology, 50(1): 119-128. DOI:10.1111/1365-2664.12029

Schiemer, F., Baumgartner, C., Tockner, K., 1999. Restoration of floodplain rivers: The 'Danube restoration project'. Regulated Rivers: Research & Management, 15(1-3): 231-244. DOI:10.1002/(sici)1099-1646(199901/06)15:1/3<231::aid-rrr548>3.0.co;2-5

Schulz-Zunkel, C. et al., 2012. Nährstoffrückhalt. In: Scholz, M. et al. (Eds.), Ökosystemfunktionen von Flussauen. Bundesamt für Naturschutz, Bonn - Bad Godesberg, pp. 48-72. In Naturschutz und Biologische Vielfalt 124.

Skublics, D., Rutschmann, P., 2015. Progress in natural flood retention at the Bavarian Danube. Natural Hazards, 75: 51-67.

Tockner, K. et al., 2008. Flood plains: critically threatened ecosystems. In: Polunin, N.V.C. (Ed.), Aquatic Ecosystems - Trends and Global Prospects. Cambridge University Press, pp. 45-61. DOI: https://doi.org/10.1017/CBO9780511751790

Venohr, M. et al., 2011. Modelling of Nutrient Emissions in River Systems – MONERIS – Methods and Background. International Review of Hydrobiology, 96(5): 435-483. DOI:10.1002/iroh.201111331

Vidon, P. et al., 2010. Hot Spots and Hot Moments in Riparian Zones: Potential for Improved Water Quality Management1. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 46(2): 278-298. DOI:doi:10.1111/j.1752-1688.2010.00420.x

Vorhersagemodelle in KIWaSuS: Vorverarbeitungsschritte für die Entwicklung von KI-Modellen

Juliana Koltermann da Silva, Benjamin Burrichter, Markus Quirmbach

Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsprojekts KIWaSuS (KI-basiertes Warnsystem vor Starkregen und urbanen Sturzfluten) wird ein Echtzeitwarn- und Echtzeitmanagementsystem für urbane Sturzfluten unter Einsatz von Verfahren der Künstlichen Intelligenz (KI) entwickelt. Um die Ziele des Projekts zu erreichen, ist die Entwicklung von Vorhersagemodellen, die die Überflutungsflächen genau und zeitnah lokalisieren können, maßgeblich. Dafür werden ein Niederschlagsvorhersagemodell zum Nowcasting von Starkregenereignissen unter Einsatz von Maschinellen Lernverfahren und zwei KI-Modelle für die Prognose des Überstaus und der Überflutung aus dem Kanalnetz entwickelt. Ein wesentlicher Bestandteil von KI-Verfahren ist das Modelltraining, das dem Modell ermöglicht, komplexe und spezifische Aufgaben zu erlernen. Dementsprechend werden die Generierung und Vorverarbeitung der Datensätze für das Training der drei KI-Modelle in KIWaSuS beschrieben.

1. Vorstellung des Projekts KIWaSuS

Das zunehmende Auftreten von Starkregenereignissen stellt ein erhöhtes Sicherheitsrisiko für die Bevölkerung in hochverdichteten urbanen Gebieten dar, da sie zum Überstau der Kanäle und zu Überflutungen von Straßen und Unterführungen führen können. Die Folgen solcher Ereignisse konnten in den vergangenen Jahren deutschlandweit besonders in den Sommermonaten wahrgenommen werden, was aufgrund des Klimawandels in Zukunft noch häufiger zu erwarten ist. Um die Tätigkeit der Einsatzkräfte während dieser Ereignisse zu unterstützen, wird im Rahmen des Forschungsvorhabens KIWaSuS (KI-basiertes Warnsystem vor Starkregen und urbanen Sturzfluten) ein Echtzeit- und Echtzeitmanagementsystem vor urbanen Sturzfluten entwickelt. Wie in Abbildung 1 dargestellt, werden in einer intuitiven Visualisierungsoberfläche detaillierte und zeitnahe Informationen über das vorhergesagte Ausmaß der Starkregenereignisse und Überflutungen dem Krisenmanagement zur Verfügung gestellt.

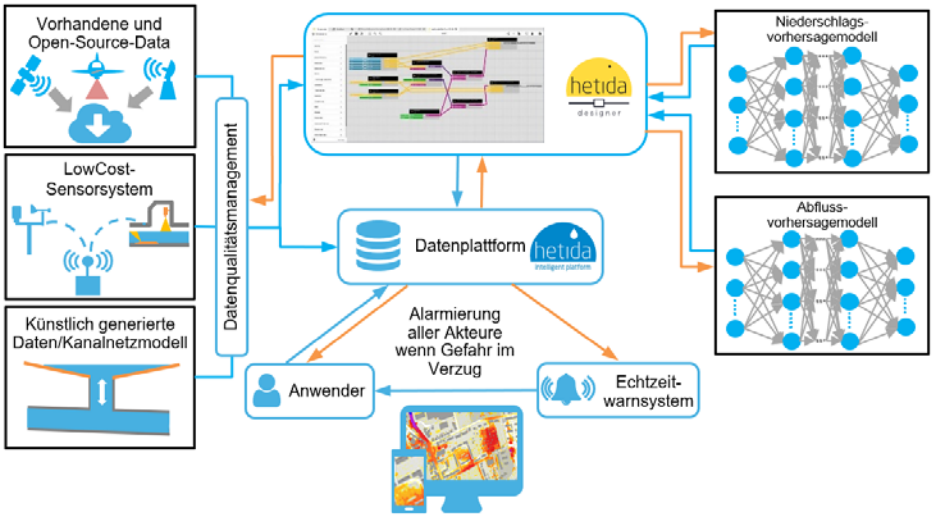


Abb. 1: Aufbau des geplanten Echtzeitwarnsystems in KIWaSuS

Um möglichst genaue und zeitnahe Informationen über die bevorstehenden Ereignisse vorhersagen zu können, werden Verfahren der Künstlichen Intelligenz (KI) in der Entwicklung der

Niederschlags- und Überflutungsvorhersagemodelle eingesetzt. Da KI-Verfahren datengetriebene Methoden sind, sind die Anforderungen an Datensätze und Datenvorverarbeitung für die zu entwickelnden Modelle besonders hoch.

2. Entwicklung des Niederschlagsvorhersagemodells

2.1 Zielsetzung

In KIWaSuS soll ein Niederschlagsvorhersagemodell zum Nowcasting insbesondere von konvektiven Starkregenzellen entwickelt werden. Herkömmliche Niederschlagsvorhersagemodelle für einen Vorhersagehorizont von bis zu zwei Stunden basieren auf Zell-Tracking- und Extrapolation-Verfahren. Sie ermöglichen zeitnahe Prognosen anhand einer Analyse von vergangenen Radarmessungen. Dennoch können diese Modelle nur begrenzt Änderungen in der räumlichen Ausdehnung oder in den Niederschlagsintensitäten von Niederschlagszellen vorhersagen. Ziel des zu entwickelnden Modells ist daher die Genauigkeit von den Vorhersageergebnissen mithilfe von KI-Verfahren zu verbessern.

Um die Modellgüte des KI-Modells auswerten zu können, wird ein Benchmark-Modell ausgewählt. Das DenseRotation-Modell vom Python-Package rainymotion (Ayzel et al., 2019) stellt dazu eine gute Alternative dar, da es laut der genannten Publikation bessere Ergebnisse als RADVOR (Winterrath et al., 2012) erzielen konnte. Das in Abbildung 2 dargestellte Sommerereignis, bei dem das Modell DenseRotation eingesetzt wurde, verdeutlicht noch einmal den Bedarf einer verbesserten Niederschlagsvorhersage, die mit Hilfe des KI-Modells erzielt werden soll. Die Unterschiede zwischen Messung und Vorhersage sind für einen Vorhersagehorizont von 30 Minuten eindeutig. Das analysierte Ereignis wies eine Wiederkehrzeit von 30 Jahren nach der Niederschlagsstatistik für die Station Gelsenkirchen-Altstadt der Emschergenossenschaft auf.

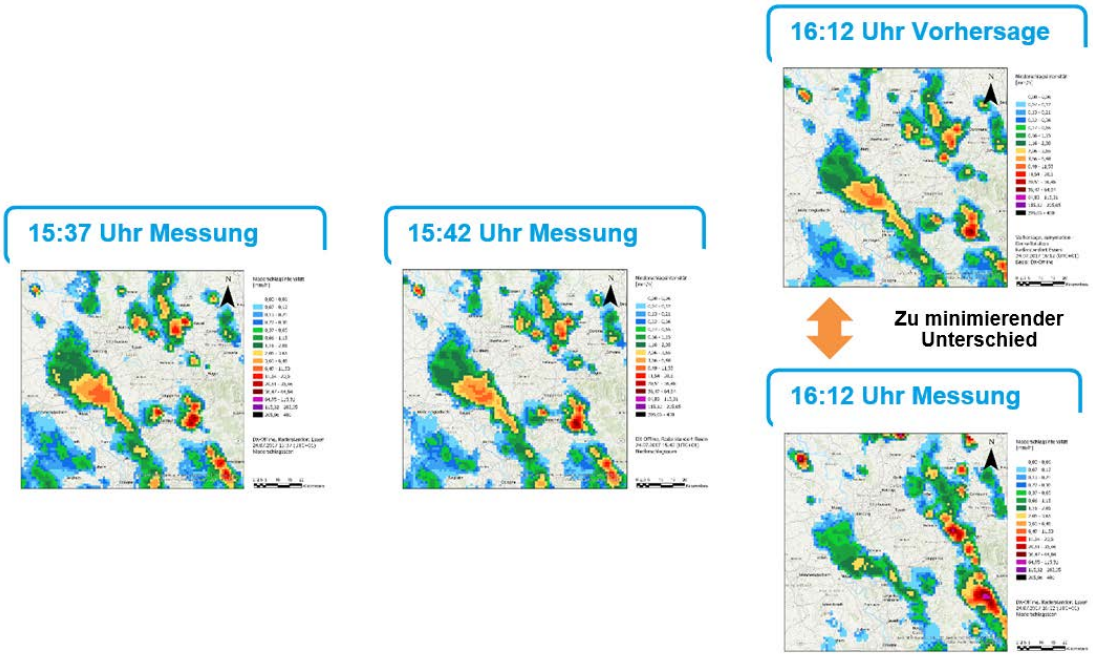


Abb. 2: Aktuell mögliche Niederschlagsvorhersage durch das DenseRotation-Modell von rainymotion (Ayzel et al., 2019)

Für das Trainings des KI-Modells werden Radardaten des DX-Produktes vom DWD (Deutscher Wetterdienst, 2016) für den Radarstandort Essen verwendet. Das DX-Produkt bietet zeitlich hoch aufgelöste und flächendeckende Reflektivität-Messungen an, die für die Vorhersage von Niederschlag verwendet werden könnten. Sie liegen als Rohdaten vor und sind daher ohne Korrektur nicht für Modellierungszwecke geeignet. Deswegen werden die DX-Offline-Daten als Zielgröße für das KI-Modelltraining eingesetzt. DX-Offline-Daten sind das Ergebnis des DX-Offline-Projektes (Treis et al., 2016), in dem DX-Daten des DWD umfassend aufbereitet wurden. Die Bearbeitungsschritte umfassen Datenkorrekturen und Aneichungen mit terrestrischen Messungen. Tabelle 1 gibt die wesentlichen Eigenschaften der beiden Datensätze wieder.

Tab. 1: Übersicht über die in KIWaSuS verwendeten Radarprodukte (Quelle: Pfister et al., 2015, eigene Überarbeitung)

Produkt	Inhalt	Auflösung		Intensitäten	Methode	On-line	Off-line
		räuml.	zeitl.				
DX (DWD)	Radarre-flektivitäten	1km x 1° Azimuth	5 Min	256 Klassen (RVP-6 Units)	lokales Radar-produkt am Standort Essen	X	
DX-Off-line	Nieder-schlagsin-tensitäten	1km x 1km	5 Min	0,01 mm / 5 Min	Korrigierte Ra-dardaten		X

2.2 Identifizierung von Starkregenereignissen

Das KI-Modell soll Muster bei der Entstehung und Entwicklung von Starkregenzellen erlernen, und weswegen das Modell ausschließlich mit diesen Radardaten trainiert wird. Außerdem sind DX-Offline-Daten pixelweise in einer nicht-äquidistanten Zeitreihe abgespeichert und müssen in ein Radarbild-Format umgewandelt werden. Die Erstellung der Radarbilder muss nur für relevante Zeitstempel durchgeführt werden. Diese relevanten Zeitstempel weisen Starkregen-ereignisse ab einer Widerkehrzeit von T = 3 Jahre auf und können auf Basis der DX-Offline-Daten identifiziert werden.

Die DX-Offline-Daten liegen von 2001 bis 2019 vor und wurden von den Verbundpartnern Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV NRW) und Emschergenossenschaft und Lippeverband (EGLV) für einen Radius von 80 km um den Radarstandort Essen zur Verfügung gestellt. Wegen der in früheren Jahren geringeren Qualität der Radarmessungen wurden nur Daten ab dem Jahr 2004 für die Identifizierung der Ereignisse und weitere Bearbeitungsschritte einschließlich Modellentwicklung berücksichtigt.

Der erste Schritt für die Identifizierung der relevanten Niederschlagsereignisse ist die Umrechnung der Zeitreihen in eine 5-minütige Auflösung, wie die original zeitliche Auflösung des DX-Produktes. Danach sind zwei Bearbeitungsschritte erforderlich:

1) Identifizierung von relevanten Ereignissen in jeder Zeitreihe durch ein gleitendes Fenster
2) Überprüfung der räumlichen Nachbarschaft von den vorher identifizierten Ereignissen durch DBSCAN, die zu dem Scikit-Learn-Package in Python gehört (Pedregosa et al., 2011)

Die Analyse mit gleitendem Fenster dient für die Erkennung von Pixeln und Zeitstempeln, deren Niederschlagssummen relevante Schwellenwerte überschreiten. Diese Schwellenwerte

wurden von der Niederschlagsstatistik der Station Gelsenkirchen-Altstadt der Emschergenossenschaft anhand Partieller Serien (DWA-A 118, 2016) abgeleitet. Darauf aufbauend wurden Niederschlagsereignisse ausgewählt, die in mindestens einer Dauerstufe von 15 bis 240 Minuten eine Wiederkehrzeit von mindestens 3 Jahre besitzen, sodass genügende Zeitstempel, bzw. Ereignisse für das Training des Modells vorliegen.
DBSCAN (Pedregosa et al., 2011) ist eine dichtebasierte räumliche Clusteranalyse. Es wird geprüft, ob die vorher identifizierten Pixel in einem bestimmten Zeitstempel benachbart sind. DBSCAN kann basierend auf den Pixelkoordinaten und der Pixelanzahl in den Gruppen (Dichte) Starkregen-Cluster von Rauschen unterscheiden. Im konkreten Fall wird eine Gruppe von Pixeln als Cluster charakterisiert, wenn die Gruppe mindestens vier benachbarte Pixel in einem Fenster von neun Pixeln enthält. Das heißt, eine Starkregenzelle muss mindestens 4 km² abdecken, um als relevant identifiziert zu werden. Einige solcher möglichen Cluster sind in Abbildung 3 zu sehen.

2.3 Vorverarbeitung der Radardaten

Die Vorverarbeitung der Radardaten hat mit dem Datensatz der DX-Offline-Daten begonnen. Die Bearbeitungsschritte für die DX-Offline-Daten sind in Abbildung 3 dargestellt. Nach der Durchführung des ersten Analyseschrittes für die Identifizierung relevanter Starkregenereignissen wurden 37.417 Zeitschritte identifiziert und nach der Analyse der räumlichen Nachbarschaft wurde die Anzahl auf 28.337 Zeitschritte reduziert.

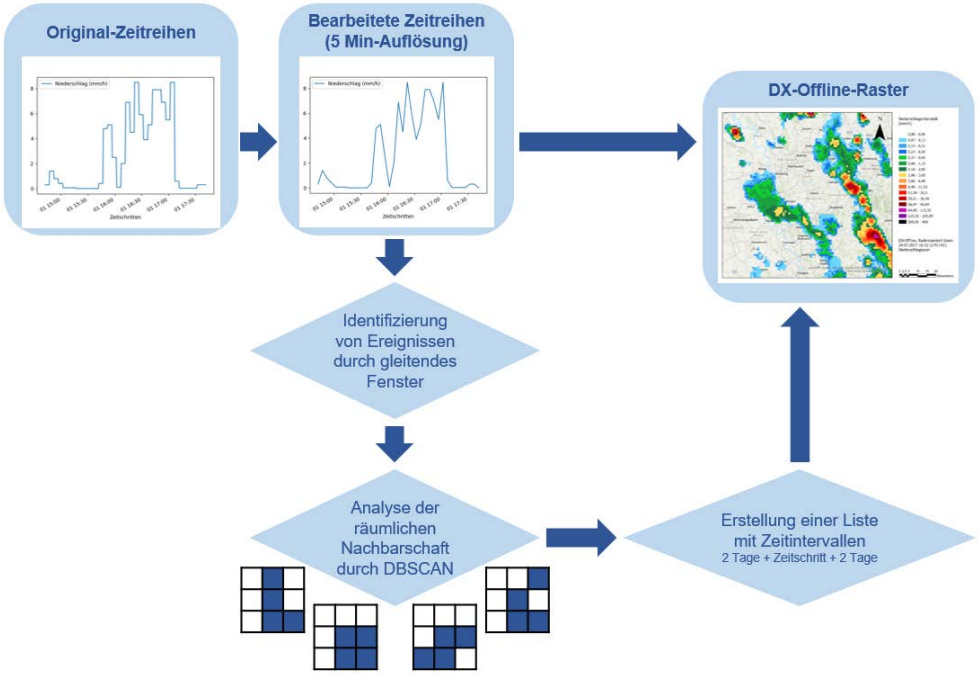


Abb. 3: Vorverarbeitung der DX-Offline-Daten

Da das Modell soweit wie möglich auch Entstehungs- und Verfallsprozesse der Starkregenzellen erlernen soll, wurden noch Vorlauf- und Nachlaufzeiten von je zwei Tagen zu den 28.337 Zeitstempeln ergänzt. Mit der Berücksichtigung der Vorlauf- und Nachlaufzeiten wurden insgesamt 376.871 Zeitschritte in 192 Zeitintervallen für die Rastererstellung aufgenommen. Die

Zeitintervalle umfassen überwiegend Tage in den Monaten zwischen April und Oktober. Dies entspricht den Erwartungen, da die Niederschlagsvorhersagen im Projekt KIWaSuS auf konvektive Ereignisse, die besonders in den Sommermonaten auftreten, fokussiert sind.
Als erster Schritt für die Vorverarbeitung der DX-Daten vom DWD wurde eine Überprüfung der Datenvollständigkeit durchgeführt. Dabei wurden Ausfälle bei den Aufzeichnungen von Radarmessungen aus technischen Gründen im DX-Produkt-Datensatz für den Zeitraum 2012-2020 identifiziert. Die Ausfälle sind nicht in den DX-Offline-Datensatz übertragen worden, da für die zugehörigen Zeitstempel die DX-Offline-Daten mithilfe von Interpolationsverfahren und Daten aus anderen Radarstandorten ergänzt wurden. Sie können trotzdem die richtige räumliche Struktur der Starkregenzellen nicht sicher abbilden und sollen daher nicht als Trainingsdatensatz für das KI-Modell verwendet werden. Die Ausfälle der DX-Daten des DWD wurden daher im DX-Offline-Datensatz entfernt. Wegen der Ausfälle wurden 4.053 Zeitschritte bzw. Dateien gelöscht, sodass am Ende 373.010 Rasterdateien mit aufbereiteten Radardaten zur Verfügung stehen.
Außerdem müssen die DX-Daten des DWD in kartesische Koordinaten umgerechnet werden. Das DX-Produkt ist ursprünglich in einem Polarkoordinatensystem und in einem binären Format abgespeichert. Die DX-Daten können mithilfe des Pakets wradlib (Heistermann et al., 2013) in Python eingelesen und durch einen Algorithmus in Python umgerechnet werden. Diese Umrechnung ist auch in der Vorbereitung der DX-Offline-Daten vom Auftragnehmer des DX-Offline-Projekts implementiert worden. Wie bei der Vorverarbeitung der DX-Offline-Daten wurden nur DX-Daten des DWD für die vorher identifizierten Zeitschritte in kartesische Koordinaten umgerechnet. Eine Übersicht über die Umrechnung der DX-Daten ist in Abbildung 4 gegeben.

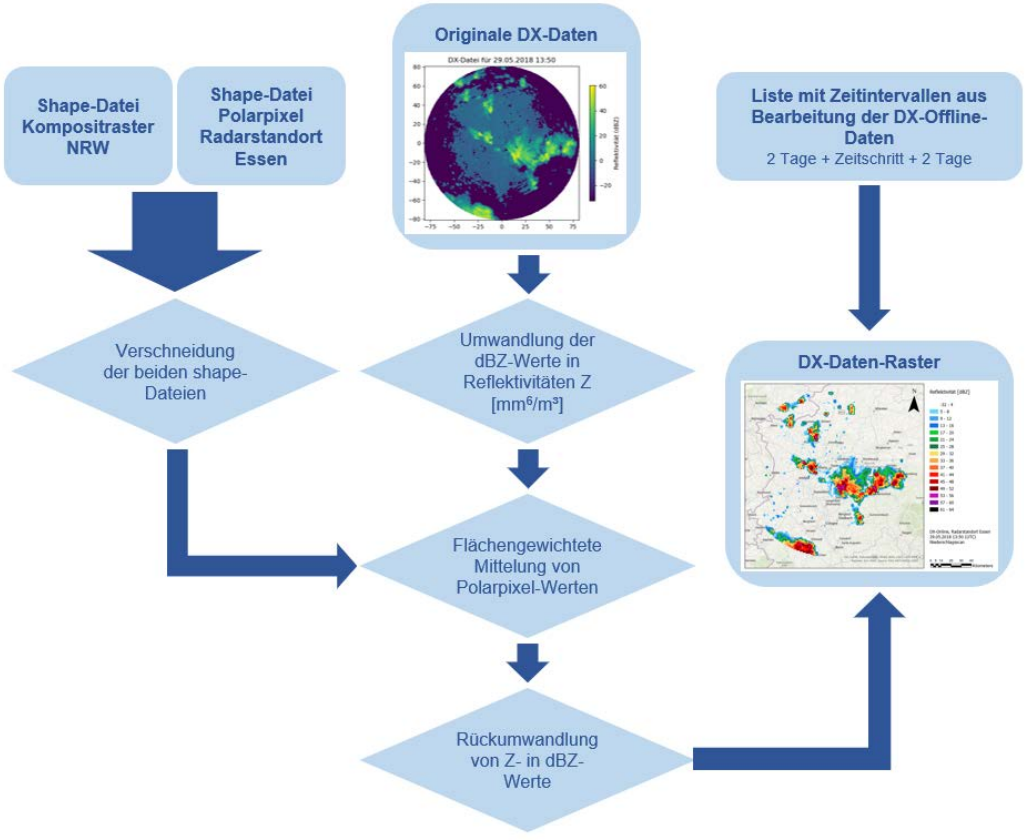


Abb. 4: Umrechnung der DX-Daten des DWD in kartesische Koordinaten

Die DX-Daten werden mit frei verfügbaren und schon in Python implementierten Verfahren korrigiert, um die anschließende Auswahl von KI-Verfahren zur Niederschlagsvorhersage von vorneherein nicht einzuschränken. Diese Korrektur muss vor der Umrechnung in kartesische Koordinaten stattfinden und soll vor allem Festziel-, Boden- und dynamische Echos eliminieren, als auch Dämpfungseffekte minimieren.

3. Entwicklung des Überflutungsvorhersagemodells

3.1 Zielstellung und Methodik

Aufbauend auf der Starkregenvorhersage wird ein Überflutungsvorhersagemodell für kanalinduzierte Überflutungen entwickelt. Ziel dieses Modells ist die verzögerungsarme Darstellung der resultierenden Überflutungssituation in Abhängigkeit von der Niederschlagsvorhersage. Gegenüber den sehr rechenintensiven hydrodynamischen Berechnungsmodellen mit Rechendauern von mehreren Stunden sollen so die Ergebnisse in wenigen Minuten vorliegen, so dass eine Vorhersage der bevorstehenden Überflutungssituation ermöglicht wird.

Um dieses Vorhaben zu ermöglichen, wird ein zweistufiger Ansatz verfolgt. Zunächst wird ein Modell für die Vorhersage der Überstauvolumina an den einzelnen Schächten im Einzugsgebiet entwickelt (Modell 1) und anschließend ein zweites Modell zur Ermittlung der Überflutungsflächen (Modell 2). Beide Modelle werden verbunden, indem die prognostizierten Überstauganglinien aus dem Modell 1 als Eingangsgröße in das Modell 2 angesetzt werden. Beide Modelle erhalten zudem als Eingabe die Niederschlagsvorhersage aus dem im vorherigen Kapitel beschriebenen Vorhersagemodell sowie die Niederschlagsmessungen der letzten Zeitschritte. Darüber hinaus erhält das Modell 1 die Füllstandsmessungen aus einem Low-Cost-Sensorsystem für die letzten Zeitschritte. Ziel ist es, so den aktuellen Systemzustand im Kanalnetz mit in die Prognose einfließen zu lassen. Da es für die Erfassung der Zielgrößen Überstau und Überflutungsflächen derzeit noch keine Messdaten gibt, werden diese mit Hilfe eines in der Software MIKE+ (DHI, 2021) implementierten physikalisch basierten 1D/2D Berechnungsmodell erzeugt. Das Ziel bei der Modellentwicklung ist dementsprechend, den Unterschied zu den Ergebnissen der physikalisch basierten Berechnungsmodelle weitestgehend zu minimieren. Einen Überblick über den geplanten Modellaufbau sowie die beschriebene Untersuchungsmethodik liefert Abbildung 5.

3.2 Generierung des Trainingsdatensatzes

Bei der Modellierung von Prozessen mit Maschinellen Lernverfahren ist zunächst ein Trainingsprozess erforderlich, in dem das Verfahren anhand von Beispielpärchen den Zusammenhang zwischen Eingaben und der gewünschten Zielgröße erlernt. Die Genauigkeit des späteren Modells hängt daher stark von den für den Trainingsprozess zur Verfügung gestellten Trainingsdatensatz ab. Für das Training werden Niederschlagsdaten von historischen Ereignissen verwendet, für die mit Hilfe der hydrodynamischen Berechnungsmodelle die jeweiligen Zielgrößen bestimmt werden. Da Kanalnetze in Deutschland gemäß DIN EN 752:2017 und DWA-A 118 (2006) für Überstauhäufigkeiten im Bereich von 2 bis 10 Jahren auszulegen sind, sind Niederschlagsereignisse, die zu einer Überlastung der Kanalisation führen, recht selten.

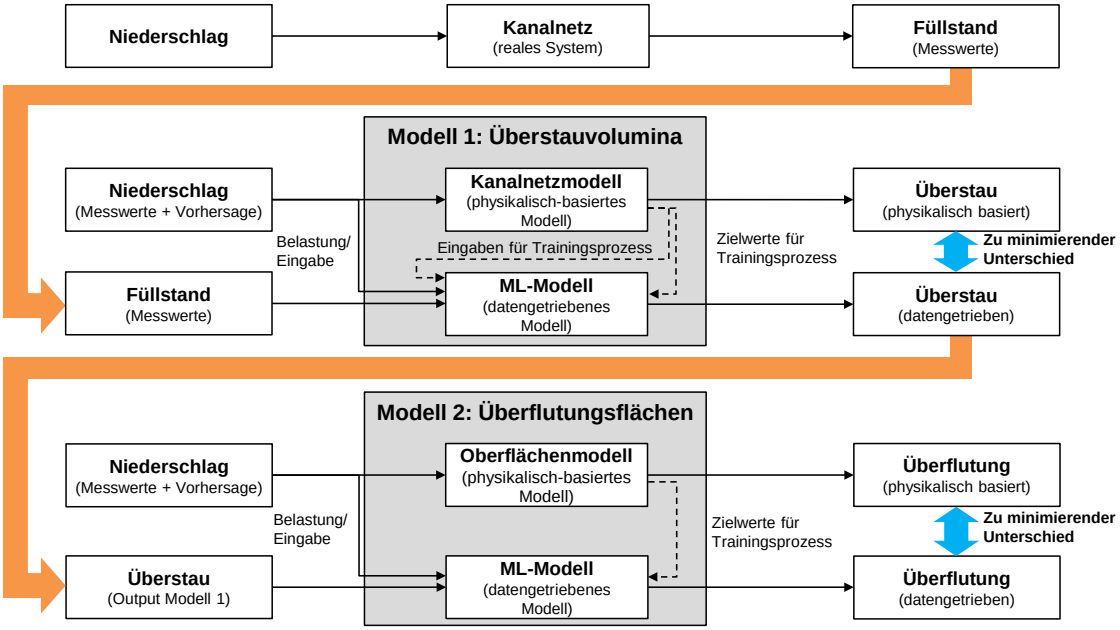


Abb. 5: Modellaufbau und Untersuchungsmethodik

Das zu entwickelnde Vorhersagemodell ist jedoch genau an diese Ereignisse adressiert und soll die volle Bandbreite aller potentiell in der Realität möglichen Überlastungsereignisse möglichst adäquat vorhersagen. Die alleinige Betrachtung der Niederschlagszeitreihe der nächstgelegenen Station ist somit nicht zielführend. Stattdessen wurde bei der Erzeugung der Trainingsdatensätze zum einen auf Niederschlagsdaten von mehreren Stationen zurückgegriffen, und zum anderen wurden zusätzlich Modellregenreihen erstellt. Als Datengrundlage wurde auf Niederschlagszeitreihen von acht Stationen der Emschergenossenschaft zurückgegriffen, die in einem Umkreis von weniger als 50 km zum Untersuchungsgebiet liegen.

Um nur die relevanten Zeiträume für die Datengenerierung simulieren zu müssen, wurden aus den Messreihen Starkregenserien in Anlehnung an das in DWA-A 118 (2006) beschriebene Vorgehen erstellt. Insgesamt konnten so 153 Ereignisse identifiziert werden, die eine Wiederkehrzeit T > 5 Jahre aufweisen und weiter berücksichtigt werden. Während durch die realen Messdaten die Verläufe realitätsnah abgebildet werden, bieten Modellregenreihen die Möglichkeit der repräsentativen Abdeckung aller relevanten Dauerstufen und Wiederkehrzeiten. Daher wurden neben den natürlichen Regenreihen auch Modellregenreihen für die Datengenerierung berücksichtigt. Um eine möglichst große Bandbreite aller möglichen Niederschlagsbelastungen abzudecken, wurden unterschiedliche Modellregenverläufe, Dauerstufen und Wiederkehrzeiten berücksichtigt. Bei den Wiederkehrzeiten wurden zudem in Anlehnung an Schmitt (2017) sogenannte Erhöhungsfaktoren berücksichtigt, um auch Niederschläge jenseits einer Wiederkehrzeit von 100 Jahren abzudecken. Der höchste Faktor wurde in Anlehnung an die Erkenntnisse aus Untersuchungen zur Bestimmung „Maximierter Gebietsniederschlagshöhen für Deutschland (MGN)“ mit 4,0 festgelegt. Dabei handelt es sich um eine physikalisch-empirisch basierte Schätzung der vermutlich größten physikalisch möglichen Niederschlagshöhen (Meon et al., 2009). Da die MGN-Werte mit Bezug auf die DWD-KOSTRA Datenbasis etwa das 3,5- bis 4-fache der 100-jährlichen Niederschlagshöhe betragen (Schmitt,

2017, zitiert nach Schmidt, 1997) wurde diese Obergrenze auch hier als maximale Niederschlagshöhe berücksichtigt. Insgesamt ergeben sich so 105 Modellregen bzw. mit den natürlichen Niederschlagsereignissen 258 Ereignisse. Mit Hilfe des hydrodynamischen Modells wurden dann für diese Ereignisse die Überstauganglinien und Überflutungsflächen als zugehörige Zielgrößen für den Trainingsprozess ermittelt (vgl. Abbildung 6).

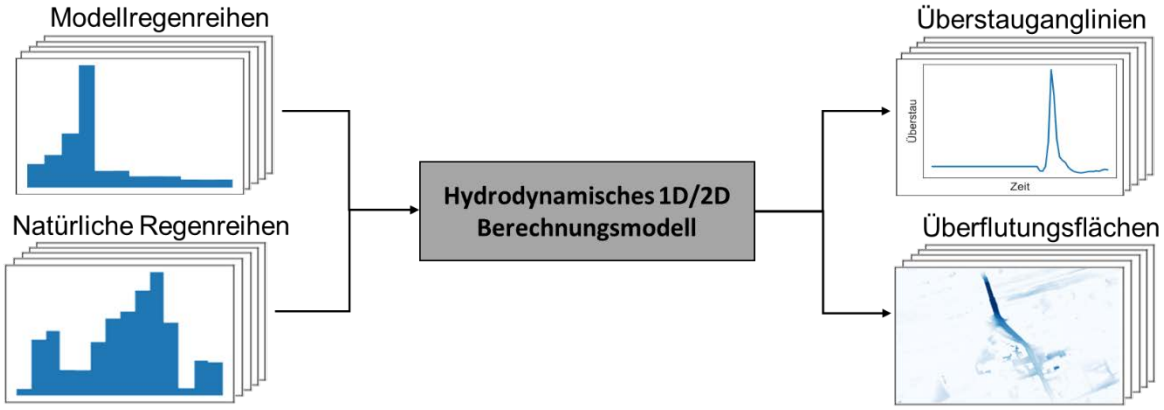


Abb. 6: Prozess der Datengenerierung mit den relevanten Ein- und Ausgaben

4. Fazit und Ausblick

Der Einsatz von KI-Verfahren bei der Entwicklung von Vorhersagealgorithmen in KIWaSuS spielt eine wesentliche Rolle für die erfolgreiche Erfüllung der Projektziele. Um die Vorwarnzeiten signifikant zu erhöhen, sind zeitnahe Ergebnisse zu der bevorstehenden Überflutungssituation nötig. Damit die Akteure des kommunalen Krisenmanagements detaillierte Informationen bekommen, sollen die Vorhersagemodelle für Niederschlag und Überflutungsflächen möglichst genaue Ergebnisse erzielen. Gegenüber aktueller Vorhersageverfahren stellen KI-Modelle einen erfolgsversprechenden Lösungsansatz dar, diese Ziele zu erreichen.

Da KI-Verfahren aus datengetriebenen Methoden bestehen, sind Voraussetzungen für ihre Verwendung ein umfangreicher Datensatz und eine zielorientierte Datenvorverarbeitung. KI-Modelle müssen zunächst trainiert werden, sodass sie gewisse Aufgaben erlernen können. Dabei hängt die Qualität der Modellergebnisse stark vom Trainingsdatensatz ab. Deswegen werden die KI-Modelle nur mit den Daten, die relevant für das Lernproblem sind, trainiert. Im Rahmen des Projekts KIWaSuS bedeutet das, dass die vorliegenden Messdaten nur relevant sind, wenn sie Starkregenereignisse aufweisen.

Die hier beschriebenen Arbeiten erläutern, wie die Selektion relevanter Starkregenereignisse aus den Messzeitreihen von Radar- und Niederschlagsdaten durchgeführt wurde. Außerdem wurde die Erzeugung künstlich generierter Daten erklärt, was dem KI-Modell ermöglicht, mit einem Trainingsdatensatz, der alle möglich relevante Niederschlagsbelastungen abdeckt, trainiert werden zu können.

Alle vorgestellten Prozesse, die zur Datenvorverarbeitung gehören, sind für Maschinelle Lernverfahren von großer Bedeutung und haben einen signifikanten Teil der ersten Arbeiten bei der KI-Modellentwicklung von beiden Modellen beansprucht. Die nächsten Schritte umfassen die Auswertung von unterschiedlichen KI-Modellen basierend auf den generierten Datensätzen und die Auswahl eines geeigneten Lernverfahrens für die vorgegebenen Aufgaben. Für

weitere Informationen zum Projekt KIWaSuS wird auf die Projekt-Homepage www.kiwasus.de verwiesen.

5. Danksagung

Die beschriebenen Arbeiten werden durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Forschungsvorhabens „KIWaSuS – KI-basiertes Warnsystem vor Starkregen und urbanen Sturzfluten“ (Förderkennzeichen 13N15556) als Teil der Förderrichtlinie „Künstliche Intelligenz in der zivilen Sicherheitsforschung“ gefördert. Die Niederschlagsdaten wurden von den assoziierten Partner LANUV NRW (Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW) und EGLV (Emschergenossenschaft und Lippeverband) sowie vom DWD zur Verfügung gestellt.

Literatur

Ayzel, G.; Heistermann, M.; Winterrath, T., 2019. Optical flow models as an open benchmark for radar-based precipitation nowcasting (rainymotion v0.1). Geosci. Model Dev. 12, 1387–1402, DOI: https://doi.org/10.5194/gmd-12-1387-2019.

Deutscher Wetterdienst, 2016. Standortprodukt DX – Informationen zum Standortprodukt DX. https://www.dwd.de/DE/leistungen/radarprodukte/standortprodukt_dx.html. Abgerufen am 01.03.2022.

DHI, 2021. MIKE+. Release 2021 Update 1. Hg. v. Danish Hydraulic Institute (DHI). Hørsholm, Denmark.

DWA, 2006. Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen. Arbeitsblatt DWA-A 118. März 2006. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA) (DWA-Regelwerk).

DIN EN 752:2017, 2017. Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden - Kanalmanagement.

Heistermann, M.; Jacobi, S.; Pfaff, T., 2013. Technical Note: An open source library for processing weather radar data (wradlib). Hydrol. Earth Syst. Sci. 17, 863–871, DOI:10.5194/hess-17-863-2013.

Meon, G.; Stein, K.; Förster, K.; Riedel, G., 2009. Abschlussbericht zum Forschungsprojekt "Untersuchung starkregengefährdeter Gebiete". Braunschweig.

Pedregosa, F.; Varoquaux, G.; Gramfort, A.; Michel, V.; Thirion, B.; Grisel, O.; Blondel, M.; Prettenhofer, P.; Weiss, R.; Dubourg, V.; Vanderplas, J.; Passos, A.; Cournapeau, D.; Brucher, M.; Perrot, M. et al., 2011. Scikit-learn: Machine Learning in Python. Journal of Machine Learning Research 12, 2825–2830.

Pfister, Angela; Treis, Adrian; Teichgräber, Burkhard, 2015. Der Einsatz von Radardaten für wasserwirtschaftliche Zwecke bei Emschergenossenschaft und Lippeverband. KW Korrespondenz Wasserwirtschaft 8 (2), 115–124.

Schmidt, Thomas, 1997. Maximierte Gebietsniederschlagshöhen für Deutschland. Bonn: Wirtschafts- und Verl.-Ges. Gas und Wasser (Mitteilungen des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V, 29).

Schmitt, Theo G., 2017. Ortsbezogene Regenhöhen im Starkregenindexkonzept SRI12 zur Risikokommunikation in der kommunalen Überflutungsvorsorge. KA Korrespondenz Abwasser, Abfall 64 (4), 294–300.

Treis, Adrian; Einfalt, Thomas; Weigl, Elmar; Keller, Tilo; Gattke, Christian; Kaiser, Michaela et al., 2016. Kombination hochaufgelöster Radarniederschlagsinformationen und terrestrischer Ombrometerdaten – Ergebnisse des DX-Offline Projektes der Wasserverbände NRW mit dem Deutschen Wetterdienst. KW Korrespondenz Wasserwirtschaft 9 (4), 233–242.

Winterrath, T., Rosenow, W., and Weigl, E., 2012. On the DWD quantitative precipitation analysis and nowcasting system for real-time application in German flood risk management, in: Weather Radar and Hydrology, IAHS Publ. 351, S. 323–329, verfügbar unter: https://www.dwd.de/DE/leistungen/radolan/radolan_info/Winterrath_German_flood_risk_management_pdf.pdf?blob=publicationFile&v=4.

Bewertung von Niederschlagsextremereignissen auf Basis von Radardaten

Thomas Einfalt, Alrun Jasper-Tönnies, Markus Jessen

Zusammenfassung

Radargemessene Niederschlagsdaten sind heute ein unverzichtbares Werkzeug zur Niederschlagsüberwachung und Vorhersage. Aufgrund ihrer hohen zeitlichen und räumlichen Auflösung gestatten sie ein zeitlich-räumliches Monitoring, das weder mit Stationsnetzen noch Satellitendaten möglich ist. Extremwertstatistische Auswertungen von Niederschlägen sind sensitiv gegenüber Messfehlern, Verfahrensunterschieden bei der Nachbearbeitung von Messdaten und Unterschieden in der räumlich-zeitlichen Auflösung. Auf Basis von Radardaten kommt es tendenziell zu einer systematischen Unterschätzung von Extremwerten im Vergleich zu Regenschreibermessungen, insbesondere bei kurzen Dauerstufen (60 min und kürzer). In einer Auswertung von partiellen Serien für das Jahr 2019 im Rahmen von DX-Offline wurde gefunden, dass sich diese Unterschätzung mit einer höheren räumlichen Auflösung der Radarmessdaten (1 km x 1 ° statt 1 km x 1 km) reduziert, und bei einer Auflösung von 250 m x 1 ° wurde für Ereignisse mit einer Dauerstufe ab 15 min keine signifikante Unterschätzung mehr gefunden. Ein wichtiger Aspekt ist, dass durch Radarmessdaten wesentlich mehr Extremereignisse mit kurzen Dauerstufen erfasst werden, was zukünftig zu einer robusteren Abschätzung des Starkregenrisikos beitragen könnte.

1. Einführung

Starkregen ist eines der aktuellen Themen in der meteorologischen und hydrologischen Forschung sowie in den Fachbereichen der Verkehrsplanung und dem Bauingenieurwesen, die die Folgen solcher Ereignisse zu bewältigen haben. Die Aktualität des Themas ist eng mit Klimawandel und den dadurch veränderten Auftretenshäufigkeiten von extremen Ereignissen verknüpft (Quirmbach et al., 2021).

2. Radarmessungen

Radargemessene Niederschlagsdaten sind heute ein unverzichtbares Werkzeug zur Niederschlagsüberwachung und Vorhersage. Aufgrund ihrer hohen zeitlichen (5 Minuten) und räumlichen Auflösung (Einzelradar: 250 m x 1°; Deutschlandkomposit des Deutschen Wetterdienstes: 1 km x 1 km) gestatten sie ein zeitlich-räumliches Monitoring, das weder mit Stationsnetzen noch Satellitendaten möglich ist. Durch die Einführung der Open Data-Strategie des Deutschen Wetterdienstes (DWD) im Jahr 2017 stehen diese Daten auch uneingeschränkt zur Verfügung.

3. Vorhersagen

Die hohe Datendichte der Radarmessung ermöglicht es, auf Basis dieser Messdaten Vorhersagen zu erstellen. Bereits frühzeitig wurden einfache Verfahren der künstlichen Intelligenz (KI) für die Verarbeitung von Radardaten verwendet wie Bildverarbeitungsverfahren, Objektorientierung und hierarchische Clusteranalyse (Einfalt et al., 1990). Heute werden hier wesentlich weiterentwickelte Methoden eingesetzt, die auch geeignet sind, den Vorhersagehorizont zu verlängern und die Vorhersagegenauigkeit abzuschätzen, zum Beispiel durch Nutzung von Ensembles oder in Kombination mit anderen Verfahren (z. B. Jasper-Tönnies et al., 2018, Sideris et al., 2020, Shehu & Haberlandt, 2021).

4. Datenqualität

Für die Nutzung der Radarmessung in der Praxis spielt die Datenqualität der Radarmessung und ihre Verbesserung (Michelson et al., 2005) in Kombination mit einer hochqualitativen Stationsmessung eine wesentliche Rolle. Die Radarmessung selbst hat zwei Eigenschaften, die für die hydrologische Nutzung einer Nachbearbeitung bedürfen: Bei der Messung können Fehler auftreten oder Objekte gemessen werden, die nicht-meteorologischen Ursprungs sind. Die Radarmessung ist außerdem eine indirekte Messung und misst Reflektivitäten, deren Quantifizierung als Niederschlagsintensität mit relevanten Unsicherheiten einhergeht.

In einem Kooperationsprojekt („DX-Offline“) der Wasserverbände in Nordrhein-Westfalen (NRW) und des LANUV NRW mit dem DWD (Treis et al., 2016) werden seit 2007 mit jährlicher Aktualisierung Radardaten und Stationsdaten geprüft, korrigiert und verarbeitet. Das Ergebnis ist ein kombinierter Datensatz aus Messungen von bis zu 1000 Stationen und von vier Radarstandorten. Sowohl die Stationsdaten als auch die Radardaten wurden im Rahmen des DX-Offline-Kooperationsprojekts einer umfangreichen Qualitätsprüfung unterworfen, die die Eliminierung von unplausiblen Daten in mehreren Korrekturschritten beinhaltet (Abbildung 1). Diese Daten sind auf Tagesbasis angeeichte Radardaten und liegen u.a. auf einem 1 km x 1 km-Raster für NRW vor (Abbildung 2) und haben eine zeitliche Auflösung von 5 Minuten („NRW-Komposit“) mit einer aktuellen Beobachtungslänge vom 01.11.2000 bis zum 01.11.2020.

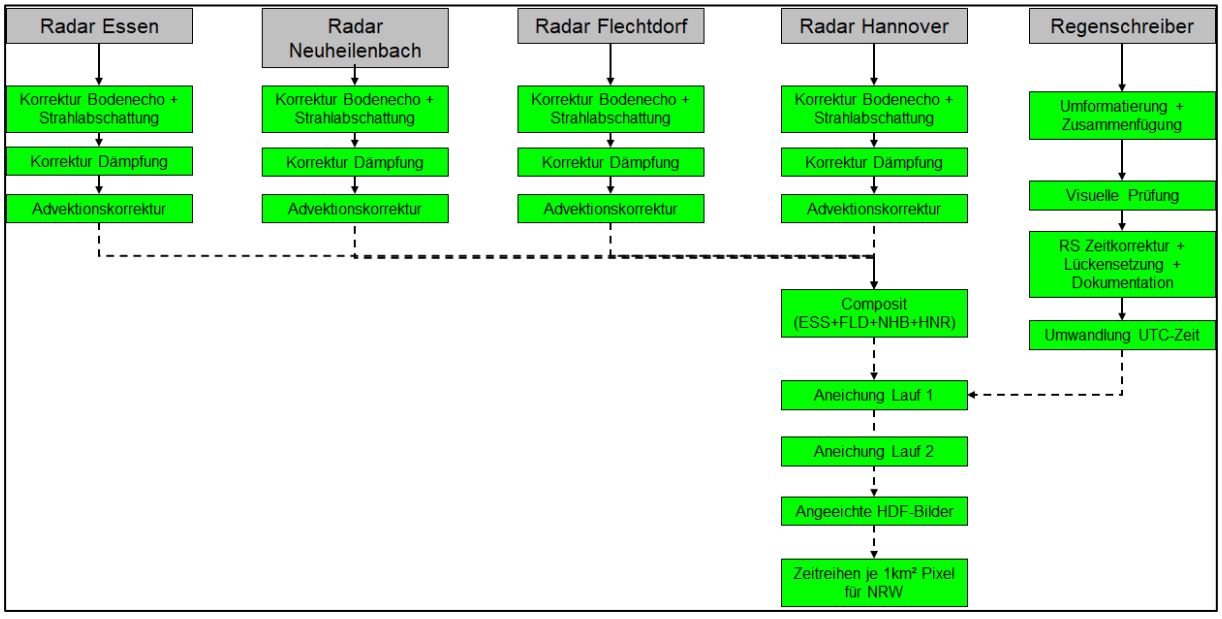


Abb. 1 Arbeitsablauf für die Erstellung der Daten im Rahmen des DX-Offline-Projektes

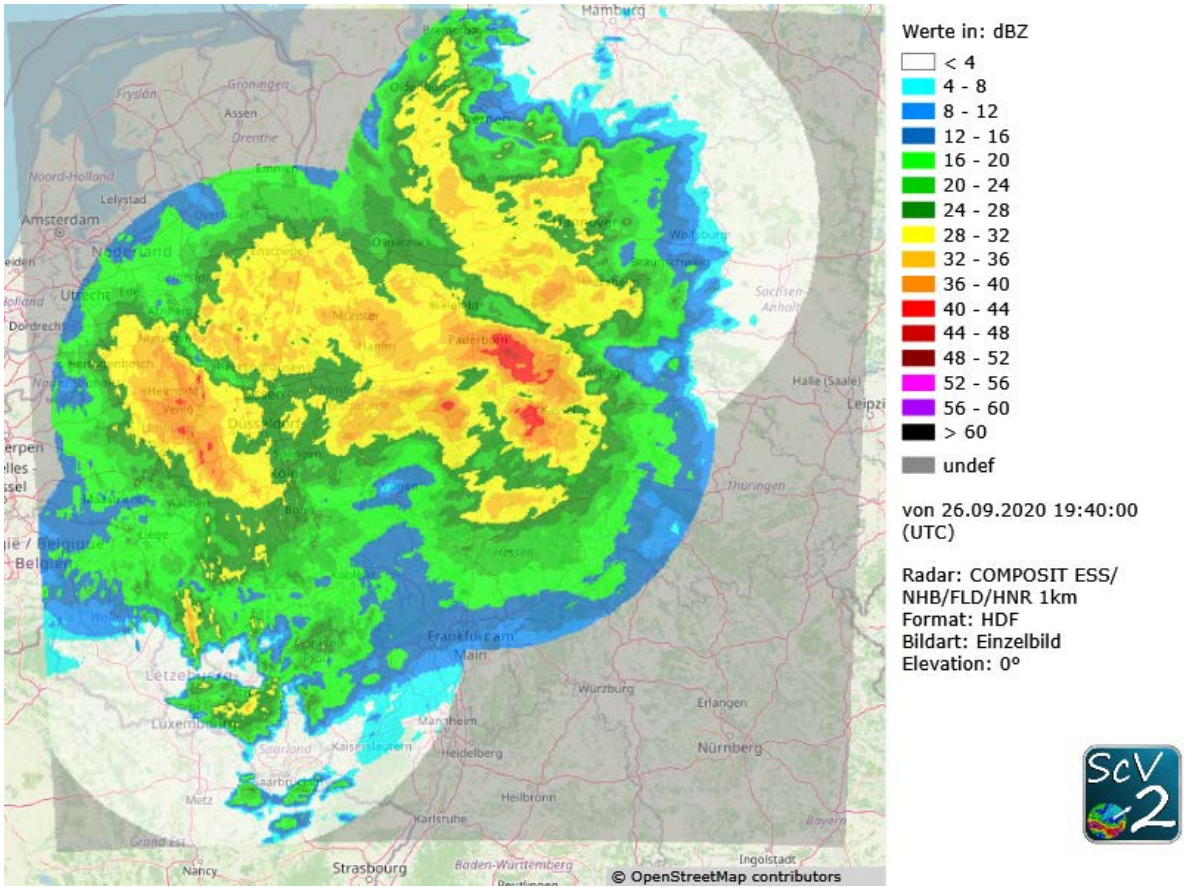


Abb. 2 Beispielbild für das Ergebnis der Berechnungen am 26.9.2022 um 19:40 Uhr UTC in Reflektivitäten (dBZ)

5. Ereignisdatenbank

Auf diesen Daten basiert die Ereignisdatenbank NRW (Strehz et al., 2019), die gestattet, für beliebige Suchgebiete und Dauerstufen die höchsten Niederschlagsereignisse pro Rasterpunkt zu finden und zu analysieren. Diese können dann einer weitergehenden Bewertung unterzogen werden, und für Modellanwendungen exportiert oder auch an andere Orte verschoben werden.

Außerdem können zum Beispiel Aussagen getroffen werden, dass es vor 2021 in NRW ein Ereignis gab mit einer Tagessumme > 200 mm (Münster 2014) und 30 Ereignisse mit einer Tagessumme > 130 mm. Arbeiten für eine deutschlandweite Datenbank wurden beim DWD begonnen (Lengfeld et al., 2021) und werden in einem aktuellen Projekt der LAWA weitergeführt, mit dem Ziel, eine dauerhafte Dokumentation mit übersichtlicher Abfragemöglichkeit zu schaffen.

6. Statistik

Bei extremwertstatistischen Auswertungen aus Niederschlagsmessdaten spielen mehrere Faktoren eine Rolle: Einige Messungenauigkeiten treten speziell im extremen Bereich auf. Bei Radarmessdaten können zu hohe Werte z. B. durch (nicht korrigierte) Clutter oder Hagel verursacht werden. Andererseits treten auch zu niedrige Werte auf, wenn die Messung z. B. durch Abschattung oder Dämpfung beeinträchtigt wird oder fehlerbehaftete Bereiche interpoliert

werden. Zusätzlich wirkt sich die Wahl der ZR-Beziehung, d.h. der Umwandlung von radargemessenen Reflektivitäten in Intensitäten, in Kombination mit einer eventuellen Aneichung mit Regenschreiberstationen aus. Unabhängig vom Messprinzip ist die Verteilungsfunktion, die bei der extremwertstatistischen Auswertung an die Messdaten angepasst wird, vom Auftreten einzelner, extremer Ereignisse abhängig. Wenn systematische Einflüsse z. B. orographischer Art eine untergeordnete Rolle spielen, kann es als näherungsweise zufällig beschrieben werden, wo einzelne, extreme Ereignisse auftreten und ob diese an einem Ort und in einem Zeitreihenabschnitt vorkommen. So eine räumlich zufällig wirkende Verteilung wurde im Zeitraum 2001-2020 für weite Bereiche Deutschlands für Starkregenereignisse mit einer Dauerstufe bis zu 9 Stunden beschrieben (RADKLIM, 2021). Hohe Unsicherheiten gibt es insbesondere für Ereignisse mit einer Wiederkehrzeit ähnlich der Zeitreihenlänge und seltener. Die extremwertstatistische Theorie lässt hier in Unkenntnis der „wahren“ Verteilung nur eine Schätzung der Unsicherheitsbandbreite zu, unter der Annahme, dass die besonders seltenen Ereignisse der gleichen Verteilung entstammen wie die Stichprobe der partiellen oder jährlichen Serie.
Extremwertstatistische Auswertungen aus Radardaten nach DWA A-531 haben gezeigt, dass zum einen die bislang vorliegende Beobachtungsdauer von 20 Jahren noch keine robusten Auswertungen für Wiederkehrzeiten größer als 5 Jahre am jeweiligen Rasterpunkt zulässt (Quirmbach et al., 2021) und dass es im Vergleich zu Punktmessungen zu Unterschätzungen der Extrema bei Dauerstufen bis zu einer Stunde kommt (Quirmbach et al., 2021, Thomassen et al., 2022, Jessen & Einfalt, 2020), die durch eine inzwischen verfügbare, höhere räumliche Auflösung verringert werden können (Jessen & Einfalt, 2020).
In Abbildung 3 und 4 sieht man den Effekt der Aneichung in den RADOLAN-Produkten des DW: RY (korrigiertes aber nicht angeeichtes Rasterprodukt) und YW („quasi-angeeichtes“ Produkt auf Basis von RY). Ausgewertet wurden Tagessummen von Radar im Vergleich zu Regenschreibermessungen an 119 Verifizierstationen in Nordrhein-Westfalen und Berlin im Zeitraum 01.07.2021-31.01.2022. Durch die Aneichung wurde erreicht, dass die Tageswerte des YW-Produkts (Abbildung 3) besser mit den Regenschreiberdaten übereinstimmen. Die Quantil-Quantil-Abbildung (Abbildung 4) zeigt im genannten Zeitraum eine Unterschätzung der RY-Daten gegenüber den Regenschreiberwerten, die mit höheren Quantilen zunimmt. Im YW-Produkt ist hingegen bei dieser Aggregationsstufe nahezu keine systematische Unterschätzung zu erkennen. Aufgrund von Inhomogenitäten im RY-Produkt ist zu erwarten, dass die hier gefundene Unterschätzung nicht generell auftritt, sondern dass das Ergebnis in Abhängigkeit vom Ort und untersuchten Zeitraum variiert.
Vor dem Hintergrund der verfahrensbedingten Einflussfaktoren ist die Interpretation der Unterschiede in den Extremwertstatistiken zweier verschiedener Radarprodukte (Abbildung 5) nicht trivial. Die aus dem RADKLIM-Produkt (Winterrath et al., 2017) abgeleiteten Extremwertstatistiken unterschätzen die Niederschlagshöhe für die Wiederkehrzeit 1 Jahr, Dauerstufe 60 min im Vergleich zu den aus dem DX-Offline Produkt abgeleiteten Niederschlagshöhen und im Vergleich zu Regenschreiberdaten. Dass die Aneichung des DX-Offline Produktes im Vergleich zu RADKLIM mit einer wesentlich höheren Anzahl von Stationen erfolgt, dürfte ein wichtiger Grund für die bessere Übereinstimmung mit den Extremwertstatistiken von Regenschreibermessungen sein.

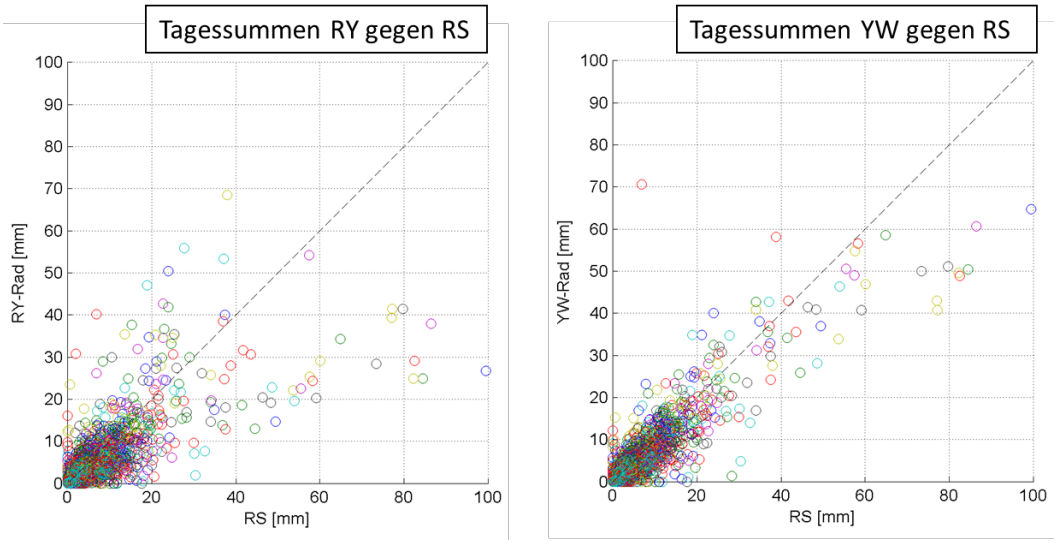


Abb. 3 Scatterplot mit Tagessummen von RY (links) und YW (rechts) gegenüber Tagessummen von Regenschreibern an 119 Verifizierstationen im Zeitraum 01.07.2021-31.08.2021.

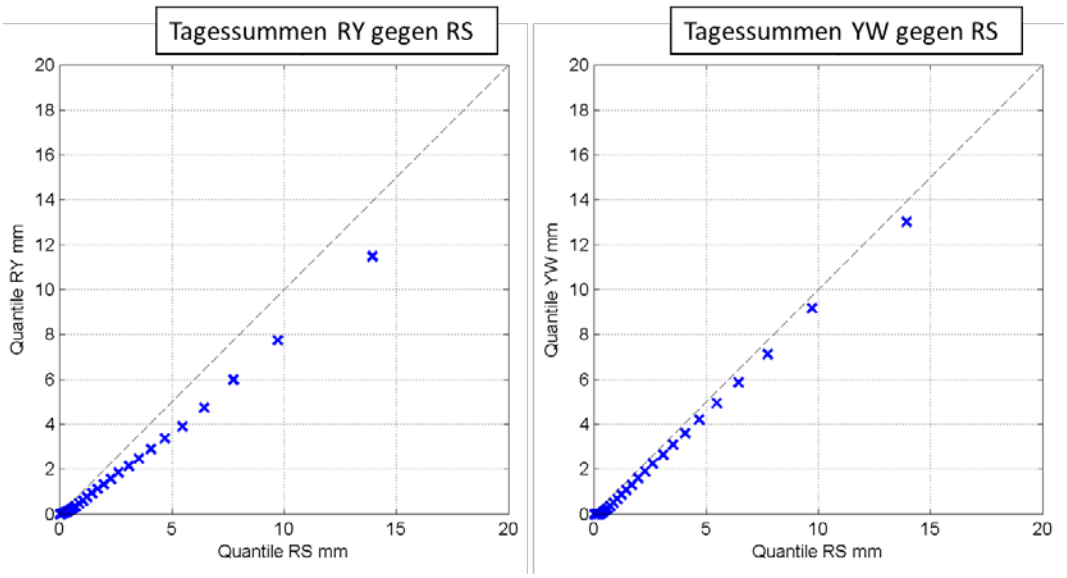


Abb. 4 Quantil-Quantil-Abbildung mit Tagessummen von RY (links) und YW (rechts) gegenüber Tagessummen von Regenschreibern an 119 Verifizierstationen im Zeitraum 01.07.2021-31.01.2022. Die Schrittweite der Quantile beträgt 2% (Maximum: 98%).

Weitere Gründe könnten in den Korrekturverfahren und den bei der Kompositierung angewandten Verfahren liegen, wie auch in Jessen & Einfalt (2020) beschrieben. Die Unterschätzung der RADKLIM-Statistiken im Vergleich zu den Regenschreiberdaten scheint über die unterschiedliche Chararakteristik (Punkt-Fläche) im Vergleich zu Stationsdaten hinauszugehen. Zu dieser Einschätzung trägt die Auswertung von partiellen Serien in Abbildung 6 bei, die für das Jahr 2019 die Niederschläge der 10 höchsten Ereignisse aus Radardaten im Vergleich zu Regenschreiberdaten an mehr als 400 Standorten von Stationen in NRW zeigt. Die Radardaten liegen in drei verschiedenen räumlichen Auflösungen vor, als 1 km x 1 km Komposit (DX Komp), als polare Daten (Niederschlagsscan des Radars Essen) mit der Auflösung 1 km x 1 ° (DX Polar) und als polare Sweep-Daten mit der feineren Auflösung 250 m x 1 ° (Sweep Polar),

bei gleichen Verfahren zur Korrektur und Aneichung entsprechend DX-Offline. Es zeichnet sich ab, dass es entscheidend von der betrachteten Dauerstufe abhängt, wie sensitiv die Extremwerte gegenüber einer Veränderung der räumlichen Auflösung sind. Bei der Dauerstufe 120 min hat keines der Produkte nennenswerte Abweichungen zum Regenschreiber-Vergleichswert (< 5 %), bei der Dauerstufe 60 min liegt nur DX Komp darüber und bei der Dauerstufe 15 min liegen sowohl DX Komp als auch DX polar darüber, während das hochaufgelöste Sweep Polar immer noch eine geringe Abweichung zum Regenschreiberergebnis aufweist. Abbildung 7 illustriert den Effekt der räumlichen Auflösung auf die Extremwerte, hier anhand einer Tagessumme vom 31. Mai 2018 von Sweep polar und DX Polar des Radars Essen.

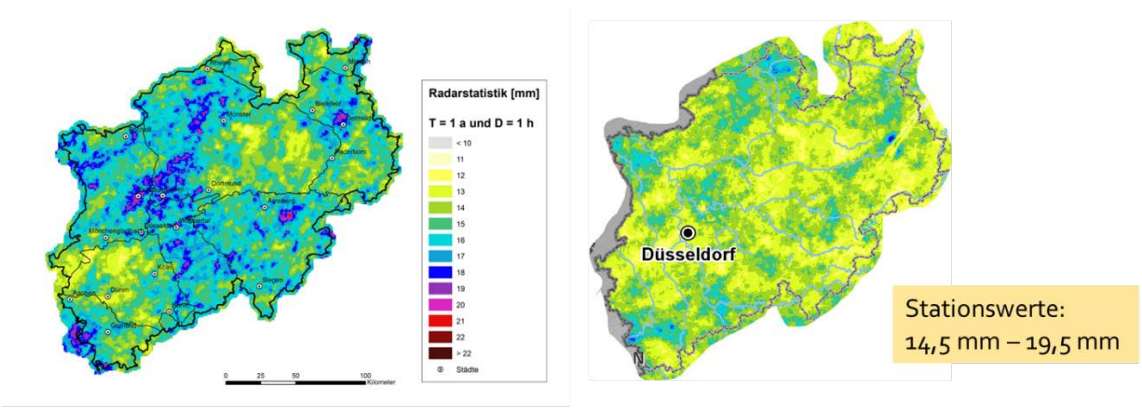


Abb. 5 Vergleich Extremwertstatistiken: Niederschlagshöhe in mm mit statistischer Wiederkehrzeit t = 1 a für die Dauerstufe D = 1 Std. für DX-Offline (links) und RADKLIM (rechts).

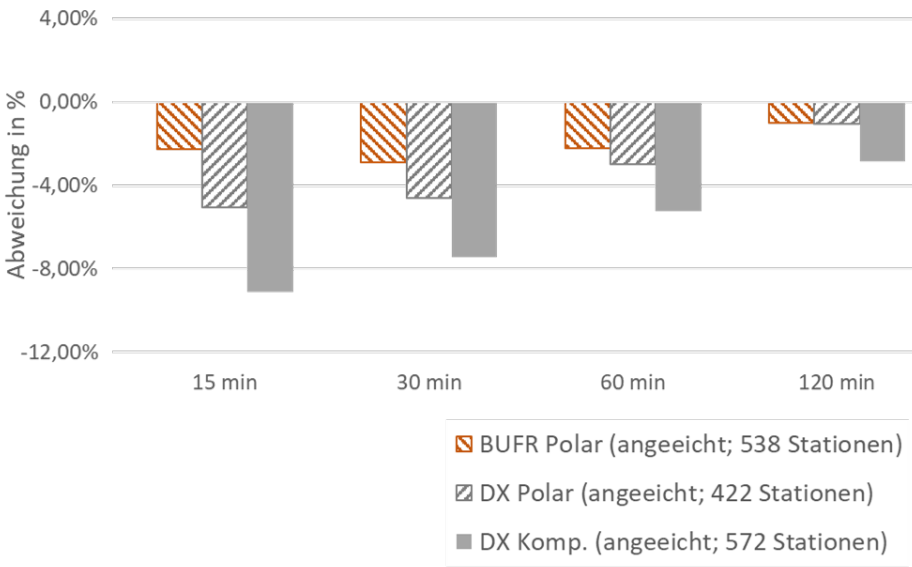


Abb. 6 Auswertung von partiellen Serien des Jahres 2019 von Radardaten mit drei verschiedenen räumlichen Auflösungen. Dargestellt ist die Abweichung in Prozent im Vergleich zu Regenschreiberdaten des Mittelwerts der jeweils 10 höchsten Ereignisse in den Dauerstufen 15 min, 30 min, 60 min und 120 min.

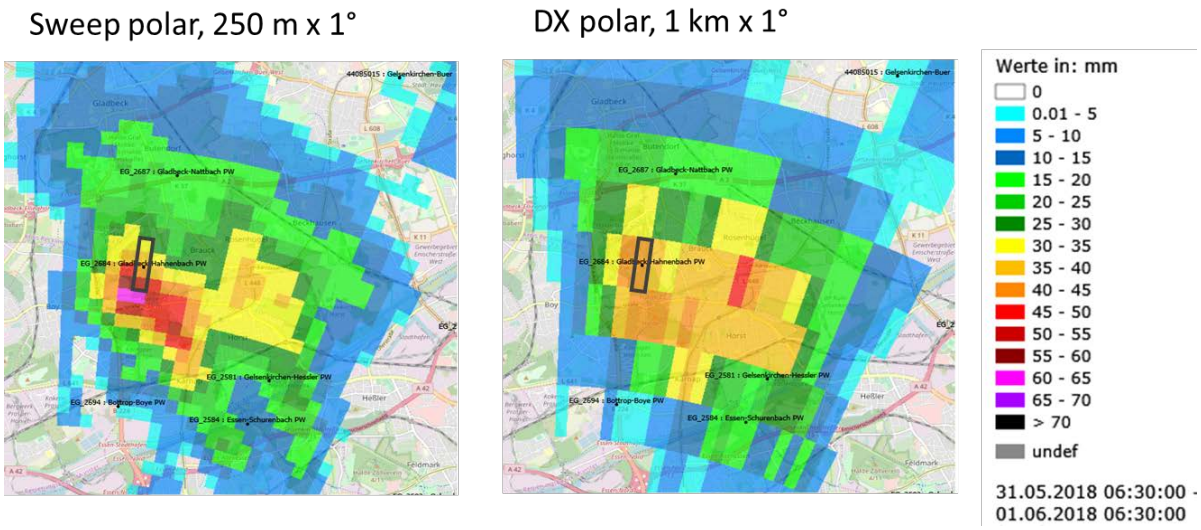


Abb. 7 Exemplarischer Effekt der räumlichen Auflösung im Radarprodukt auf extreme Messwerte. Tagessumme aus Radarmessung von den Produkten Sweep polar, 250 m x 1° (links) und DX polar, 1 km x 1° (rechts).

7. Bewertung

Radardaten erlauben es, das räumliche Ausmaß von Starkregengebieten gut zu beschreiben, während für eine genaue Mengenabschätzung eine gemeinsame Betrachtung mit Regenschreibermessungen erforderlich ist. Mit einem dichten Netz von verlässlichen Bodenstationen lassen sich damit i. d. R. belastbare Aussagen für Extremereignisse mit einer Dauerstufe ab einer Stunde treffen. Wie oben beschrieben, gibt es bei Ereignissen kürzerer Dauerstufen eine Diskrepanz zwischen Werten aus Radardaten und Stationsmessungen, die den Unterschied zwischen einer Punktmessung und einer Volumenmessung (projiziert auf eine Fläche) darstellt. Während sich im Einzelfall nicht immer entscheiden lässt, welche Daten für hydrologische Anwendungen geeigneter sind, lässt sich eine Bewertung vornehmen:

Erstens lässt sich die flächenmäßige Ausdehnung von (bekannten) Extrem-Niederschlagssummen auf Basis von Radarmessdaten gut darstellen. Dies konnte auch für die Tagessumme vom 13./14. Juli 2021 gezeigt werden (Abbildung 8).

Zweitens können mit dem Wissen, dass radargemessene Extremwerte kurzer Dauerstufen die Niederschlagsmenge unterschätzen, dann Aussagen getroffen werden, wenn bereits der Vergleich mit repräsentativen Extremwertstatistiken aus Punktmessungen eine Überschreitung von relevanten Jährlichkeiten zeigt: dann kann mit einer hohen Wahrscheinlichkeit ebenfalls angenommen werden, dass diese Wiederkehrhäufigkeiten dann ebenfalls am Punkt überschritten sind. Dies lässt sich auch auf den Starkregenindex übertragen. Bei guter Datenqualität und einer ausreichenden Dichte von Aneichstationen sind diese aus Radardaten gewonnenen Aussagen und Bewertungen fachlich belastbar für extreme Starkregenereignisse.

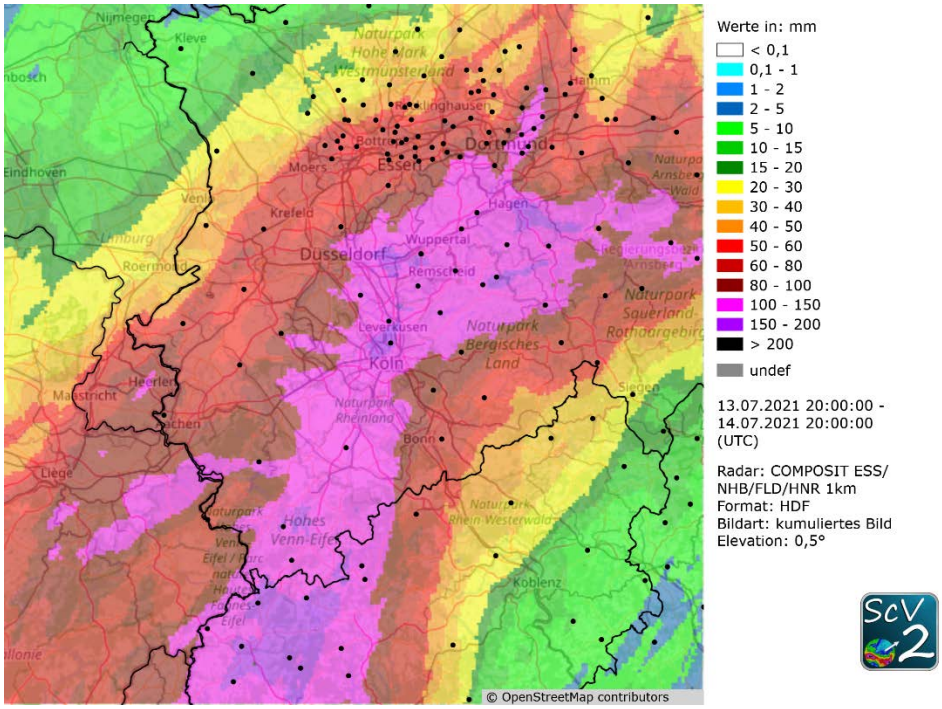


Abb. 8 Niederschlagssumme vom 13.-14.07.2021 aus dem Radarkomposit Essen, Neuheilenbach, Flechtdorf über NRW. Quelle: online-Berechnung für die Emschergenossenschaft, Qualitätsstufe 3 (nach 24 Stunden).

8. Ausblick

Radarbasierte Extremwertauswertungen sind weiterhin für Aussagen am einzelnen Punkt mit Bedacht zu verwenden. Für flächenbasierte Aussagen sind Radardaten sehr viel besser geeignet. Ein allgemein anwendbares und intuitiv verständliches Verfahren ist aber derzeit noch nicht für statistische Flächenaussagen verfügbar. Eine Bewertung von aktuellen Extremereignissen ist hingegen – unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Einschränkungen – auf Basis von KOSTRA 2010R gut durchführbar. Auf dieser Basis können Bewertungen für Punkte mit Starkregenindex (Schmitt et al., 2018) und für Flächen mittels Weather Extremity Index (Müller & Kaspar, 2013, oder Schmitt, 2021) durchgeführt werden. Vergleichende Ergebnisse zeigen, dass die Verfahren unterschiedlich komplex in der Handhabung und in der Aussagekraft sind.

Darüber hinaus werden durch Radarmessdaten wesentlich mehr Extremereignisse mit kurzen Dauerstufen erfasst als durch Stationsmessungen. Eine Frage für zukünftige Untersuchungen wird sein, wie man diese zusätzlichen Informationen fundiert nutzen kann, um möglichst robuste Extremwertstatistiken auch für kurze Dauerstufen abzuleiten und damit das Risiko starkregenbedingter Schäden genauer abzuschätzen.

Literatur

Einfalt, T., Denoeux, T., Jacquet, G. (1990) A Radar Rainfall Forecasting Method Designed for Hydrological Purposes. Journal of Hydrology, 114, pp.229-244, 1990.

Jasper-Tönnies, A., Hellmers, S., Einfalt, T., Strehz, A., Fröhle, P. (2018) Ensembles of radar nowcasts and COSMO-DE-EPS for urban flood management, Water Science and Technology, DOI: 10.2166/wst.2018.079

Jessen, M., Einfalt, T. (2020): Auswirkungen der systematischen Unterschätzung von Niederschlagsextremwerten der DX-Radardaten, Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 42.20, S. 67 – 75

Lengfeld, K., Walawender, E., Winterrath, T., Becker, A. (2021) CatRaRE: A Catalogue of Radar-based Heavy Rainfall Events in Germany Derived from 20 Years of Data. Meteorologische Zeitschrift, Vol. 30 No. 6 (2021), p. 469 - 487. DOI: 10.1127/metz/2021/1088, 2021

Michelson D., Einfalt T., Holleman I., Gjertsen U., Friedrich K., Haase G., Lindskog M., Jurczyk A. (2005) Weather radar data quality in Europe quality control and characterisation. Review, COST Action 717 - Use of radar observations in hydrological and NWP models, Luxembourg.

Mueller, M., Kaspar, M. (2013). Event-adjusted evaluation of weather and climate extremes. Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions. 1. 4481-4510. 10.5194/nhessd-1-4481-2013.

Quirmbach, M., Einfalt, T., Freistühler, E., Funke, R., Langstädtler, G., Mehlig, B., Papadakis, I., Schimetzek, V. (2021) ExUS 2020 – Umfassende Analyse der Niederschlagsentwicklung in Nordrhein-Westfalen. Korrespondenz Abwasser KA, Nr. 7, S. 524 – 531.

RADKLIM-Bulletin, Nr. 01 – 2021, Dr. Tanja Winterrath (DWD): Projekt-Rundschau, Panorama und Werkstatt, Jährliche Fortschreibung und Erweiterung der Radarklimatologie, Jahres-Ergebnisse der Klimatologie, Extreme Niederschlagsereignisse des vergangenen Jahres https://www.dwd.de/DE/fachnutzer/wasserwirtschaft/radarniederschlag/radklim-bulletin/radklimbulletin2021download.html. Abgerufen am 01.06.2022.

Schmitt, T.G., Krüger, M., Pfister, A., Becker, M., Mudersbach, C., Fuchs, L., Hoppe, H., Lakes, I. (2018) Einheitliches Konzept zur Bewertung von Starkregenereignissen mittels Starkregenindex, KW Korrespondenz Wasserwirtschaft, Nr. 2, 2018, pp. 82ff.

Schmitt, T.G. (2021) Starkregenindex SRI als Grundlage der Kategorisierung von Starkregen nach raum-zeitlicher Ereignisausprägung. GWF Wasser / Abwasser, 01/21.

Shehu, B., Haberlandt, U. (2021) Relevance of merging radar and rainfall gauge data for rainfall nowcasting in urban hydrology. Journal of Hydrology, Volume 594, 2021, 125931, ISSN 0022-1694, https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125931.

Sideris, IV, Foresti, L, Nerini, D, Germann, U. (2020) NowPrecip: localized precipitation nowcasting in the complex terrain of Switzerland. QJR Meteorol Soc. 2020; 146: 1768– 1800. https://doi.org/10.1002/qj.3766

Strehz, A., Einfalt, T., Alderlieste, M. (2019) HydroNET-SCOUT – Ein Webportal zum Zugriff auf qualitätsgeprüfte Niederschlagsdaten. Tag der Hydrologie 28./29.3.2019, Karlsruhe.

Thomassen, E.D., Thorndahl, S.L., Andersen, C.B., Gregersen, I.B., Arnbjerg-Nielsen, K., Sørup, H.J.D. (2022) Comparing spatial metrics of extreme precipitation between data from rain gauges, weather radar and high-resolution climate model re-analyses. Journal of Hydrology 610 (2022)

Treis, A.; Einfalt, T.; Weigl, E.; Keller, T.; Gattke, C.; Kaiser, M.; Schitthelm, D.; Pfister, A. (2016): Kombination hochaufgelöster Radarniederschlagsinformationen und

terrestrischer Ombrometerdaten, Ergebnisse des DX-Offline Projektes der Wasserverbände NRW mit dem Deutschen Wetterdienst. KW Korrespondenz Wasserwirtschaft, Jg.9, Nr. 4, 2016, S.233-242.

Winterrath, T., Brendel, C., Hafer, M., Junghänel, T., Klameth, A., Walawender, E., Weigl, E., Becker, A. (2017) Erstellung einer radargestützten Niederschlagsklimatologie. Berichte des Deutschen Wetterdienstes, Nr. 251. Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach.

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	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	vergriffen
Heft 08.05	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	vergriffen
Heft 03.05	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	vergriffen
Heft 09.05	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	vergriffen
Heft 10.05	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 Bartusseck, Hani Sewilam 314 Seiten, 131 Abbildungen, 25 Tabellen, Format A4 ISBN 3-937758-68-2	42 EUR, CD 29 EUR
Heft 11.05	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	38 EUR, CD 29 EUR
Heft 12.05	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	38 EUR, CD 29 EUR
Heft 13.05	Abflussbildung – Prozessbeschreibung und Fallbeispiele Herausgeber: Axel Bronstert Monographie, 2005 148 Seiten, 81 Abbildungen, 12 Tabellen, Format A4 ISBN 3-937758-91-7	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 45 EUR, CD 29 EUR
ISBN-13: 978-3-939057-57-4

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 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-RoseTrübger, Hans-B. Kleeberg
Band 1 Vorträge, 276 Seiten
Band 2 Poster, 17 Seiten beide Bände zusammen 60 EUR, , CD 29 EUR
ISBN: 978-3-940173-04-1

Heft 21.07 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 48 EUR, CD 29 EUR

Heft 22.07 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 48 EUR, CD 29 EUR

Heft 23.08 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-Reinhhard Verworn, Hans-B. Kleeberg
300 Seiten, Format A4, mit Poster-CD 48 EUR, CD 29 EUR
ISBN: 978-3-940173-96-6

Heft 24.08 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 48 EUR, CD 29 EUR

Heft 25.09 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 48 EUR, CD 29 EUR

Heft 26.09 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 48 EUR, CD 29 EUR
ISBN: 978-3-941089-54-9

Heft 27.10	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	50 EUR, CD 29 EUR
Heft 28.10	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	50 EUR, CD 29 EUR
Heft 29.10	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	50 EUR, CD 29 EUR
Heft 30.11	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	50 EUR, CD 29 EUR
Heft 31.12	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	50 EUR, CD 29 EUR
Heft 32.13	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	50 EUR, CD 29 EUR
Heft 33.13	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	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

Heft 43.22 Im Wandel - Klima, Wasser und Gesellschaft: Prozesse – Methoden – Kommunikation.
Beiträge zum Tag der Hydrologie am 22./23. März 2022 in München
Herausgeber: Markus Disse, Ralf Ludwig, Markus Reisenbüchler
100 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-96862-213-2
DOI: 10.14617/for.hydrol.wasbew.43.22

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