

Uwe Haberlandt, Luisa-Bianca Thiele, Ross Pidoto & Anne Bartens

Ein Framework für die abgeleitete Hochwasserstatistik

A framework for derived flood frequency analyses

Unter abgeleiteter Hochwasserstatistik wird hier die Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten aus der kontinuierlichen hydrologischen Modellierung mit stochastisch erzeugten Eingangsdaten verstanden. Ein entsprechendes Framework wurde im Rahmen des Teilprojektes 7 (Titel) der DFG-Forschungsgruppe SPATE (Space-Time Dynamics of Extreme Floods) entwickelt. Es besteht aus einem stochastischen Niederschlagsmodell, einem Wettergenerator zur Simulation der zusätzlich benötigten Klimavariablen, einem hydrologischen Modell und einer entsprechenden Kalibrierungsstrategie. Es ermöglicht die Ableitung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten für die Gegenwart und die Zukunft sowie die Abschätzung von deren Unsicherheiten. Innovativ sind speziell die gleichzeitig multivariate, zeitlich hoch aufgelöste, kontinuierliche und skalenübergreifende Niederschlagsmodellierung, die Kopplung des Niederschlagsmodells mit einem zeitlich hoch aufgelöstem Wettergenerator und eine neue Kalibrierungsstrategie für die abgeleitete Hochwasserstatistik. Im vorliegenden Beitrag werden die Entwicklung und Testung der Komponenten des Frameworks vorgestellt. Die Kalibrierung und Validierung des Niederschlagsmodells und des Wettergenerators erfolgte für 400 Einzugsgebiete in Deutschland mit Flächengrößen zwischen 40 km² und 23.700 km² unter Verwendung von ca. 700 Niederschlagsstationen und einem Rasterklimadatensatz. Die hydrologische Validierung erfolgte für 140 Einzugsgebiete, für die beobachtete langjährige Hochwasserscheitelabflüsse vorliegen. Die Ergebnisse zeigen skalenübergreifend eine gute Reproduktion der statistischen Eigenschaften der Niederschläge, der weiteren Klimavariablen und der Hochwasserstatistik. Für die Simulation des HQ₁₀₀ wurden ein mittlerer relativer Standardfehler von 34,8 % und ein mittlerer Bias von -19,9 % erhalten. Die Modellgüte ist vergleichbar mit ähnlichen Untersuchungen, wobei hier deutlich mehr Einzugsgebiete mit ganz unterschiedlichen Raumskalen berücksichtigt wurden.

Schlagwörter: Niederschlagsmodell, Wettergenerator, abgeleitete Hochwasserstatistik

Derived flood frequency analysis as considered within this study describes the estimation of flood frequencies from continuous hydrological modelling using stochastic input data. Within the research unit SPATE (Space-Time Dynamics of Extreme Floods), a framework for derived flood frequency analysis has been developed. This framework consists of a stochastic precipitation model, a weather generator for the simulation of additionally required climate variables, a hydrological model and an appropriate calibration strategy. The framework allows the derivation of flood frequencies for both present and future time periods, as well as the estimation of uncertainties. In this paper, the development and testing of each component of the framework is presented. Novel in this research is the precipitation model mutually incorporating considering a high temporal resolution, multi-site rainfall generation, continuous modelling and multiple spatial scales. Also, the coupling of the precipitation model with a high temporal resolution weather generator and a new calibration strategy for derived flood frequency analyses are innovative. The calibration and validation of the precipitation model and weather generator is carried out on 400 catchments in Germany, ranging in size from 40 km² to 23,700 km². 700 rainfall stations and a gridded climate dataset were used as observations. The hydrological validation is carried out on 140 catchments, for which long-term observations of instantaneous peak flows are available. Results show that for all scales a good reproduction of the rainfall, climate and flood statistics was achieved. For the simulation of HQ₁₀₀, a mean relative standard error of 34.8 % and a mean bias of -19.9 % were obtained. The model performance is comparable with other similar studies, however now including many more catchments largely differing in scales.

Keywords: precipitation model, weather generator, derived flood frequency analysis

1 Einleitung

Die Analyse der Hochwasserwahrscheinlichkeiten ist eine hydrologische Kernaufgabe und essenziell für Planung, Bemessung sowie für Risikoanalysen. Beim klassischen Vorgehen werden historische Abflussbeobachtungen statistisch analysiert, Wahrscheinlichkeitsverteilungen an Extremwertkollektive angepasst und Prognosen mit diesen statistischen Modellen erstellt. Die Anwendbarkeit dieser direkten Extremwertstatistik auf Basis beobachteter Abflüsse ist jedoch problematisch für unbeobachtete Gebiete, für Gebiete mit einem kurzen Beobachtungszeitraum, bei sich ändernden Klimaverhältnissen oder bei Änderungen der Landnutzung und -bewirtschaftung. Um diese Probleme zu umgehen, kann eine abgeleitete Hochwasserstatistik durchgeführt werden. Dabei werden Hochwasserwahrscheinlichkeiten aus der hydrologischen Modellierung abgeleitet. Landnutzungs- und Klimaänderungen können explizit berücksichtigt werden.

Zudem können damit nicht nur Hochwasserscheitel, sondern komplette Ereignisganglinien untersucht werden. Erforderlich sind dafür jedoch langjährige Zeitreihen meteorologischer Eingangsvariablen, die aus Beobachtungen oder Modellen stammen können. Die Extrapolation der beobachteterbeobachteten Abflüsse zur Schätzung seltener Ereignisse wird somit durch eine Extrapolation der Klimavariablen durch den Wettergenerator ersetzt.

Oftmals werden Niederschlagsmodelle als Datenlieferanten für die abgeleitete Hochwasserstatistik genutzt. Diese erlauben prinzipiell die Erzeugung beliebig langer Zeitreihen auch für unbeobachtete Orte und zukünftiges Klima. Einen Überblick zu Niederschlagsmodellen findet sich z. B. in ONOF (2000) oder HABERLANDT (2011). Für mesoskalige Anwendungen mit Einzugsgebieten bis ca. 1.000 km² Größe sind räumlich-zeitliche Niederschlagsmodelle mit kurzen Zeitschritten notwendig, um

die Scheitel ausreichend genau zu reproduzieren. Kürzlich hat PAPALEXIOU (2023) ein Modell für die simultane Generierung des Niederschlages an sehr vielen Stationen vorgestellt, welches jedoch nur mit Tageszeitschritten arbeitet. ONOF & WANG (2020) präsentieren Weiterentwicklungen des Bartlett-Lewis Punktprozessmodells, welches sehr gut für die univariate Modellierung geeignet ist. Neuere Radar-basierte Niederschlagsmodelle (z. B. PELEG & MORIN, 2014) können komplexe Strukturen abbilden, sind jedoch aufwändig und haben oft viele Parameter. Es existieren kaum kontinuierliche, zeitlich hoch aufgelöste Modelle, die auf großen Skalen arbeiten und für die abgeleitete Hochwasserstatistik praxistauglich sind. Um für die hydrologische Modellierung gleichzeitig die anderen Klimavariablen wie Temperatur, Strahlung, Luftfeuchte usw. bereit zu stellen, werden Wettergeneratoren verwendet (CARAWAY et al., 2014; CHEN et al., 2015). Herausforderungen bei der Entwicklung der Niederschlagsmodelle und Wettergeneratoren bestehen insbesondere hinsichtlich von repräsentativen räumlich-zeitlichen Simulationen mit kurzen Zeitschritten, für skalenübergreifende Modellierungen, für die Bewahrung der wechselseitigen Abhängigkeiten zwischen allen Klimavariablen und für die Berücksichtigung von Klimaänderungen (FATICHI et al., 2011).

Die hydrologische Modellierung kann Ereignis-basiert oder kontinuierlich erfolgen, wobei Letztere wegen der Vermeidung unbekannter Anfangsbedingungen zu bevorzugen ist. Es sollten Modelle gewählt werden, die einfach sind, mit kleinen Zeitschritten schnell arbeiten, und ausreichend gut das Hochwasserge-schehen nachbilden zu können (GRIMALDI et al., 2022). Letzteres und die Verarbeitung stochastischer Eingangsdaten erfordern eine spezielle Kalibrierungsstrategie unter Einbeziehung der Extremwertstatistik. Eine Kalibrierung allein auf Basis von beobachteten Abflussganglinien ist nicht optimal (CAMERON et al., 1999; HABERLANDT & RADTKE, 2014; LAMB, 1999). Die hydrologische Modellierung liefert in diesem Kontext auch eine objektive Validierung der Niederschlagsmodelle und Wettergeneratoren. Ein funktionierendes Framework, welches beliebige meteorologische Belastungen simuliert und hydrologisch auswertet kann schließlich im Rahmen von Monte-Carlo Experimenten verwendet werden, um die Vorhersagbarkeit, d. h. die Unsicherheit der Prognose von Hochwasserwahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit

von Klima, Abflussregime und Gebietseigenschaften zu untersuchen.

Im vorliegenden Artikel werden die Entwicklung und Testung solch eines Frameworks vorgestellt. Im Kapitel 2 werden die Methoden für die Niederschlagsmodellierung, den Wettergenerator und die hydrologische Modellierung erläutert. Das Kapitel 3 gibt einen Überblick zum Untersuchungsgebiet und den Daten. Die Ergebnisse werden im Kapitel 4 diskutiert, getrennt für Klima- und Abflusssimulationen. Schließlich werden im Kapitel 5 Schlussfolgerungen gezogen und ein Ausblick gegeben.

2 Methoden

2.1 Framework

Dieses einführende Kapitel gibt einen Überblick über das Framework, welches für die abgeleitete Hochwasserstatistik entwickelt wurde. Detaillierte Erläuterungen zu den einzelnen Komponenten erfolgen in den weiteren Kapiteln. Das Framework besteht prinzipiell aus 7 Modellen und 5 Datensätzen (siehe Abb. 1).

Das Niederschlagsmodell besteht aus zwei Teilen. Im ersten univariaten Teil NMOD1(t) werden für einzelne Niederschlagsstationen stündliche Zeitreihen generiert. Dann wird im multivariaten zweiten Teil NMOD2(u,t) der räumliche Zusammenhang zwischen den vorher erzeugten Punktzeitreihen an den Orten u hergestellt. Das Niederschlagsmodell wird auf Basis beobachteter stündlicher Niederschlagszeitreihen BEO-N parametrisiert. Die weiteren Klimavariablen Temperatur, Luftfeuchte und Globalstrahlung werden im Wettergenerator WGEN(u,t) raum-zeitlich konsistent als bedingte Zufallsvariablen an den vorher simulierten räumlichen Niederschlag zunächst auf Tagesbasis generiert. Im zweiten Schritt erfolgt dann deren zeitliche Disaggregation mit DISAG(t) zu Stundenwerten. Die räumliche und meteorologische Konsistenz der stündlichen Klimavariablen wird hierbei indirekt über den Tagesgang berücksichtigt. Der Wettergenerator wird mit Hilfe eines beobachteten Rasterklimadatensatzes auf Tagesbasis BEO-CLI-RAS parametrisiert. Die Disaggregation zu stündlichen Werten wird anhand beobachteter punktueller stündlicher Werte BEO-CLI validiert.

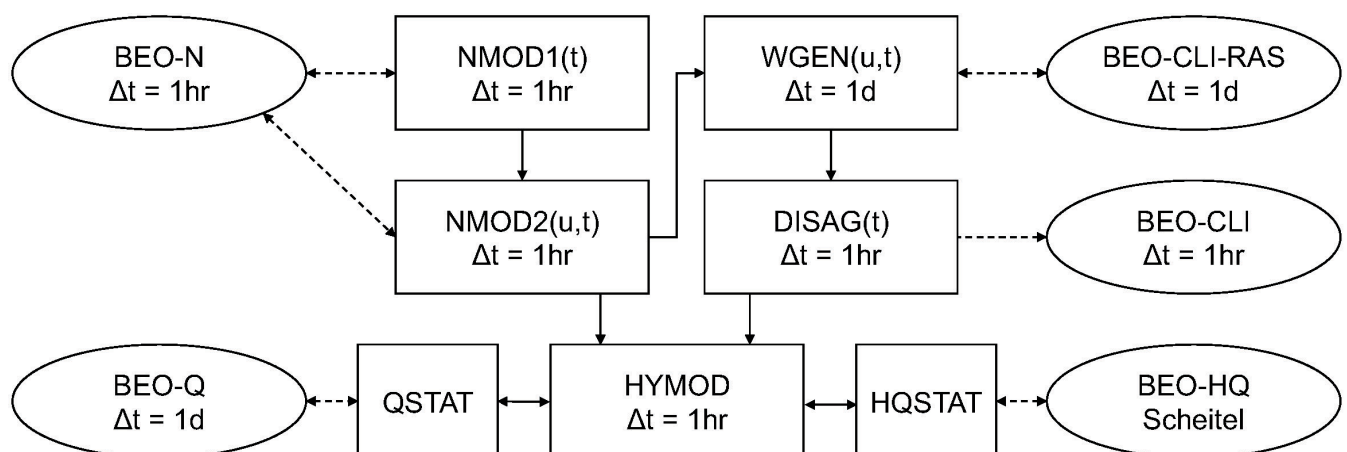


Abbildung 1

Framework für die abgeleitete Hochwasserstatistik, Modelle werden durch rechteckige und Daten durch ovale Boxen repräsentiert.
 Framework for derived flood frequency analysis; models are represented by rectangular boxes, data by oval boxes.

Die schließlich erzeugten stochastischen stündlichen Zeitreihen des Niederschlages und der Klimavariablen werden als Input für das hydrologische Modell HYMOD verwendet. Das hydrologische Modell wird auch anhand dieser stochastischen Zeitreihen kalibriert. Als Zielgrößen für die Kalibrierung werden Statistiken aus täglichen Abflüssen QSTAT sowie Statistiken der Scheitelabflüsse HQSTAT verwendet. Diese werden aus beobachteten täglichen Abflüssen BEO-Q sowie beobachteten monatlichen Höchstabflüssen BEO-HQ abgeleitet.

2.2 Niederschlagsmodell

Das Niederschlagsmodell zur punktuellen Erzeugung stündlicher Zeitreihen NMOD1(t) ist eine speziell für Hochwasseranalysen weiterentwickelte Version des in CALLAU PODUJE & HABERLANDT (2017) beschriebenen Modells. Der Niederschlag wird als Alternating-Renewal-Prozess (ARP) modelliert, bei dem die externe und interne Struktur des Niederschlagsprozesses separat betrachtet werden (siehe Abb. 2). Die externe Struktur wird durch die Abfolge von Ereignissen bestimmt, welche durch die Zufallsvariablen Niederschlagsdauer (WSD), Trockendauer (DSD) und Niederschlagsvolumen (WSA) charakterisiert sind. Nass- und Trockenperioden wechseln regelmäßig (alternating) und werden als unabhängig voneinander (renewal) angenommen. Die drei Zufallsvariablen DSD, WSD und WSA werden durch Wahrscheinlichkeitsverteilungen beschrieben, wobei die Abhängigkeiten zwischen WSD und WSA über eine Copula modelliert werden. Zur Definition der Ereignisse werden hier ein Mindestvolumen von $WSA_{min} = 1.0$ mm und eine Mindesttrockendauer von $DSD_{min} = 4$ h verwendet.

Mit der internen Struktur des Modells wird der zeitliche Verlauf des Niederschlages innerhalb der Regenereignisse beschrieben (Abb. 2, rechts). Dies wird mit Hilfe einer Exponentialfunktion realisiert, für die zusätzlich die Variablen der maximalen Niederschlagsintensität WSP und der Zeitpunkt ihres Auftretens WST_{peak} ermittelt werden müssen. Die maximale Intensität wird mit dem Niederschlagsvolumen standardisiert $Y = WSP/WSA$ und dann aus der bedingten Verteilung $F(Y|WSD)$ abgeleitet, bei der ebenfalls eine Copula zum Einsatz kommt. Der Zeitpunkt der Intensitätsspitze WST_{peak} wird schließlich aus der Gleichverteilung gezogen. Die Exponentialverteilung setzt nicht in Höhe der Spitze, sondern etwas tiefer bei der Intensität $\alpha \cdot (WSP - WSI)$ an, wobei hier $\alpha = 1/3$ gesetzt wird. In der Tabelle 1 sind verwendete

Variablen, Verteilungsfunktionen und Parameter des Niederschlagsmodells aufgelistet. Insgesamt werden für jede Niederschlagsstation 16 Parameter, getrennt für Sommer und Winter, aus den Beobachtungsdaten geschätzt.

Die ausschließliche Betrachtung von Niederschlagsereignissen mit $WSA_{min} \geq 1.0$ mm in den oben beschriebenen Ansätzen führt zur Unterschätzung des Gesamtniederschlages. Zur Bewahrung der Massenbilanz werden deshalb Ereignisse < 1.0 mm aus der Beobachtung zufällig zur modellierten Zeitreihe hinzuaddiert, bis das vorgegebene Verhältnis zwischen kleinen und großen Ereignissen erfüllt ist. Die beobachteten Abstände zwischen kleinen und großen Ereignissen werden dabei bewahrt. Weitere Details können PIDOTO & HABERLANDT (2023) entnommen werden.

Nach der unabhängigen Generierung der punktuellen Niederschlagszeitreihen, muss für deren simultane Verwendung in der hydrologischen Modellierung ein räumlicher Zusammenhang zwischen diesen Reihen hergestellt werden. Dies geschieht in der zweiten Komponente NMOD2(u,t) des Niederschlagsmodells durch diskrete Optimierung mit Hilfe von Simulated Annealing (SA) (BÁRDOSSY, 1998). Das Grundprinzip der Methodik für diese Anwendung besteht in einem Resampling der externen Niederschlagsstruktur durch das sukzessive Vertauschen zweier zufällig ausgewählter Ereignisse, solange bis eine Zielfunktion (ZF) hinreichend erfüllt ist. Das zeitliche Vertauschen der Ereignisse ist hier zulässig, da das ARP-Modell die Unabhängigkeit der Ereignisse annimmt. Die verwendete Zielfunktion enthält drei bivariate Zusammenhangsmaße, die als Funktion des Abstandes zwischen den Stationen aus den Beobachtungen zu schätzen sind (siehe Tab. 2). Das SA ist numerisch sehr aufwändig und war ursprünglich bei sequentieller Anwendung auf die Einbeziehung von maximal 5 bis 10 Stationen beschränkt. Eine Weiterentwicklung mit Hilfe genesteter Simulationen macht inzwischen auch makroskalige Anwendungen mit beliebig vielen Stationen möglich. Eine Limitation ist bis jetzt jedoch noch die Nachbildung von Advektion oder komplexen "multiple-point"-Statistiken. Die Details dieser Methodik können PIDOTO & HABERLANDT (2023) entnommen werden.

2.3 Wettergenerator

Mit dem Wettergenerator werden hier die Klimavariablen Temperatur (Minimum, Maximum und Mittelwert), Luftfeuchte und

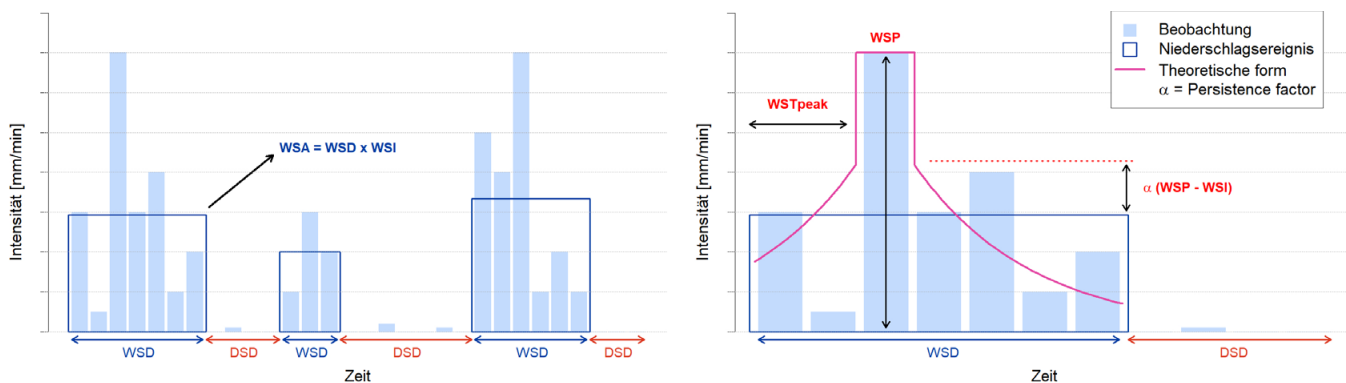


Abbildung 2

Schema der externen (links) und internen (rechts) Form des punktuellen ARP-Niederschlagsmodells.
Schematic of the external (left) and internal (right) forms of the alternating renewal single site rainfall model.

Tabelle 1

Verwendete Variablen, Verteilungsfunktionen und Parameter für das univariate Niederschlagsmodell NGEN1(t).
Used variables, probability distributions and parameters for the single site precipitation model NGEN1(t).

Variable(n)	Art	Bezeichnung	Parameter
DSD WSA Y = WSP/WSA	W-Verteilung	Weibull	ξ = Lage β = Skala δ = Form
WSD	W-Verteilung	Log-Normalverteilung	ζ = untere Schranke $\mu_{\log}$ = log Lage $\sigma_{\log}$ = log Skala
C (WSA, WSD)	Copula	Khoudraji-Gumbel	a_1 = Form a_2 = Form = 1 Θ = Gumbel-Parameter
C (Y, WSD)	Copula	Khoudraji-Normal	a_1 = Form a_2 = Form = 1 N_p = Pearson-Korrelation

Tabelle 2

Zusammenhangsmaße, die für die Optimierung der räumlichen Niederschlagsstruktur mit NMOD2(u,t) verwendet wurden, mit z_k und z_l der stündliche Niederschlag für die Stationen k und l, n_{ll} die Anzahl der Stunden mit gleichzeitigem Niederschlag an beiden Stationen ($l = 1, k = 1$) sowie n die Gesamtanzahl der Zeitschritte.

Dependence measures, used for the optimisation of the spatial rainfall structure in NMOD2(u,t), with z_k and z_l being the hourly rainfall values for station pair k and l, n_{ll} the number of hours with simultaneous rainfall at k and l and n the total number of timesteps.

Vorkommen: $p_{k,l}(z_k > 0 | z_l > 0) = \frac{n_{ll}}{n}$

Korrelation: $\rho_{k,l}(z_k > 0 | z_l > 0) = \frac{\text{cov}(z_k, z_l)}{\sqrt{\text{var}(z_k) * \text{var}(z_l)}}$

Kontinuität: $C_{k,l} = \frac{E(z_k | z_k > 0, z_l = 0)}{E(z_k | z_k > 0, z_l > 0)}$

wie bei APIPATTANAVIS et al. (2007). Dafür wird zuerst der Gebietsniederschlag aus den stündlich simulierten Daten gebildet und zu Tageswerten aggregiert. Dann wird der Niederschlag in drei Klassen eingeteilt, die über die Niederschlagsquantile definiert werden: trocken: $p < 0.50$, nass: $0.5 \leq p < 0.95$ und sehr nass: $p \geq 0.95$. Die Klimavariablen werden nun bedingt an diesen Zustand (für beide Tage t und t-1) für ein dem aktuellen Zeitpunkt entsprechendes Zeitfenster (hier $W = \pm 7$ Tage) aus den Beobachtungen gezogen. Die Auswahl geeigneter Nachbarn geschieht über die gewichtete Berechnung der euklidischen Distanz der Klimavariablen aus der historischen Reihe zum aktuell simulierten Klimavektor. Die Auswahl des nächsten Simulationswertes erfolgt auf Basis einer diskreten Wahrscheinlichkeit, die aus der Rangfolge der k nächsten Nachbarn berechnet wird, wobei $k = \sqrt{N}$ und N der Stichprobenumfang ist (LALL & SHARMA, 1996). Die Details dieser Methodik können PIDOTO & HABERLANDT (2023) entnommen werden.

Im zweiten Schritt werden mit DISAG(t) die täglich erzeugten Klimavariablen in stündliche Werte disaggregiert. Dafür werden einfache deterministische Ansätze basierend auf trigonometrischen Funktionen verwendet, die alle den typischen Tagesgang der Klimavariablen nachbilden. Dies hat neben der Einfachheit den Vorteil, dass die Klimavariablen, obwohl sie unabhängig disaggregiert werden, implizit einen Zusammenhang auch auf dem Stundenniveau bewahren. Für die Disaggregation wird das open-source Python-Tool MELODIST verwendet (FÖRSTER et al., 2016).

Strahlung als Einzugsgebietsmittelwerte simuliert. Diese werden später neben dem Niederschlag für die hydrologische Modellierung benötigt. Bei der Generierung der Klimavariablen muss gewährleistet werden, dass ihre wechselseitige Abhängigkeit, der Zusammenhang zum separat simulierten Niederschlag sowie ihre zeitliche Persistenz bewahrt werden. Zuerst werden hier mit WGEN(u,t) tägliche Zeitreihen der Klimavariablen als Gebietsmittelwerte erzeugt, die dann im zweiten Schritt mit DISAG(t) zu stündlichen Werten disaggregiert werden.

Die Modellierung der Klimavariablen mit WGEN(u,t) erfolgt mit dem k – nearest neighbor (k-NN) Bootstrap (LALL & SHARMA, 1996). Dies ist ein nicht parametrisches Verfahren, bei dem Elemente aus der Beobachtungsreihe mit Zurücklegen gezogen werden. Das Ziehen geschieht aus einer speziellen Auswahl von Beobachtungen (k – nächste Nachbarn) entsprechend ihrer Ähnlichkeit zu einem vorgegebenen Merkmalsvektor. Zur Bewahrung der Autokorrelation wird im Merkmalsvektor der zeitliche Vorgänger der Klimavariablen für den Tag (t-1) verwendet. Die Kreuzkorrelation zwischen den Klimavariablen wird automatisch reproduziert, da alle Klimavariablen gleichzeitig gezogen werden. Die Kopplung von WGEN(u,t) mit dem Niederschlagsmodell NMOD2(u,t) erfolgt auch über den Gebietsniederschlag ähnlich

2.4 Hydrologische Modellierung

Zur hydrologischen Validierung des Niederschlagsmodells und des Wettergenerators wird das hydrologische Modell (HYDMOD) HBV-IWW verwendet. Das konzeptionelle Niederschlags-Abfluss Modell wurde in vorangegangenen Studien bereits erfolgreich für die abgeleitete Hochwasserstatistik eingesetzt (DING et al., 2016; WALLNER & HABERLANDT, 2015). Eine detaillierte Modellbeschreibung kann WALLNER et al. (2013) entnommen werden.

Die hydrologische Modellierung erfolgt kontinuierlich mit einem stündlichen Zeitschritt. Die Einzugsgebiete werden horizontal in mehrere Teileinzugsgebiete unterteilt, um speziell den Niederschlag räumlich verteilt berücksichtigen zu können. Die 12 freien Modellparameter des HBV-IWWs sind dabei jedoch für jedes Teileinzugsgebiet identisch (lumped). Als Eingangsdaten für das Modell werden Niederschlag, Temperatur und potenzielle Verdunstung in stündlicher Auflösung sowie Monatswerte des Bestandskoeffizienten benötigt. Die potenzielle Verdunstung wird nach WENDLING et al. (1991) vereinfacht aus den Zeitreihen der Temperatur und der Globalstrahlung berechnet. Die Zeitreihen der Temperatur sowie der potenziellen Verdunstung werden im Unterschied zum Niederschlag als Gebietsmittel der Einzugsgebiete ohne horizontale Unterteilung eingelesen.

Die Anwendung eines hydrologischen Modells für die abgeleitete Hochwasserstatistik erfordert eine spezielle Kalibrierungsstrategie. Dies ergibt sich zum einen aus der Tatsache, dass das Ziel dabei vor allem darin besteht, die Verteilung der Hochwasserabflüsse bestmöglich zu reproduzieren (CAMERON, 1999). Zum anderen sollten bei der Modellkalibrierung die speziellen Eigenschaften der Daten, für die es angewendet wird, berücksichtigt werden (HEISTERMANN & KNEIS 2011). Hier sollen stochastisch simulierte Niederschläge und Klimadaten verwendet werden, die keinen Echtzeitbezug haben. Für die abgeleitete Hochwasserstatistik wurde deshalb vorgeschlagen, die Kalibrierung des hydrologischen Modells anhand von Abflussstatistiken vorzunehmen (HABERLANDT & RADTKE, 2014; WALLNER & HABERLANDT, 2015). Berücksichtigt man die Extremwertstatistik für die Kalibrierung, ergibt sich jedoch das Problem einer adäquaten Validierung, da für die robuste Anpassung einer Extremwertverteilung prinzipiell der gesamte Beobachtungszeitraum benötigt wird und kein Split-Sampling für die Validierung möglich ist. Zur Abmilderung des Problems wird hier vorgeschlagen, die monatlichen Höchstabflüsse (IPF_{mon}) zur Kalibrierung zu verwenden. Damit wird die Stichprobe vergrößert und ein Split-Sampling ist wieder möglich. Außerdem werden die Dauerlinie (FDC) und der Jahresgang (SAI) in die Kalibrierung einbezogen. Die Tabelle 3 zeigt die verwendeten Kriterien für Kalibrierung und Validierung sowie die entsprechenden Zeitperioden für das Split-Sampling (s. Kap. 3). In der Kalibrierung wird der relative Standardfehler (RSE, s. Gl. 3) für die drei genannten Variablen wie folgt minimiert:

$$ZF = 0,25 \cdot RSE_{FDC} + 0,20 \cdot RSE_{SAI} + 0,55 \cdot RSE_{IPF_{mon}} \rightarrow \text{Min} \quad (1)$$

Die Dauerlinie (FDC) geht mit 25 % Gewicht in die Zielfunktion ein und berücksichtigt den relativen Standardfehler ausgewählter Quantile (5 %, 25 %, 50 %, 75 %, 95 %, 98 %) aus den täglichen Abflusswerten (QSTAT). Der Jahresgang (SAI) wird zu 20 % in der Zielfunktion berücksichtigt. Hier wird der RSE aus den mittleren monatlichen Abflüssen der Kalendermonate auf Basis der täglichen Abflusswerte berechnet (QSTAT). Die verbleibenden 55 % in der Zielfunktion berücksichtigen den RSE der L-Momente erster bis dritter Ordnung (HOSKING & WALLIS, 1997) der maximalen Scheitelabflüsse pro Monat (IPF_{mon}) aus HQSTAT. Die Gewichtung der Zielfunktion wurde an WALLNER & HABERLANDT (2015) angelehnt. Die Kalibrierung erfolgt automatisch mit dem multi-kriteriellen Optimierungsalgorithmus AMALGAM (VRUGT & ROBINSON, 2007). Die Anzahl der Iterationen wird dabei auf Grund der Rechenkapazität auf 1.000 Iterationen begrenzt.

Tabelle 3

Zielkriterien und Simulationsperioden für die Kalibrierung und Validierung von HBV-IWW (s. Kap. 3).
Target criteria and simulation periods for the calibration and validation of HBV-IWW (s. Chap. 3).

Nr.	Kriterium	Kalibrierung	Validierung
1	Dauerlinie FDC	1980 – 1991	1992 – 2002
2	Jahresgang SAI	1980 – 1991	1992 – 2002
3	monatliche Scheitelabflüsse IPF _{mon}	1971 – 1995	1996 – 2018
4	Hochwasserquantile HQ _T	–	1971 – 2018

Speziell für die hydrologische Validierung des Niederschlagsmodells werden die Hochwasserquantile HQ_T aus der abgeleiteten Hochwasserstatistik verwendet. Dazu wird die 3-parametrische Allgemeine Extremwertverteilung (GEV) für die beobachteten und simulierten Abflusszeitreihen mittels L-Momenten Methode (HOSKING & WALLIS, 1997) an die jährlichen Serien der Abflusshöchstwerte angepasst. Um eine robuste Schätzung des Schiefeparameters zu erhalten, wird dafür der gesamte Beobachtungszeitraum von 48 Jahren verwendet (s. Tab. 3).

2.5 Validierung des Frameworks

Die Validierung des Frameworks erfolgt getrennt für den simulierten Niederschlag, die simulierten Klimavariablen und den simulierten Abfluss. Zur Abschätzung der Simulationsgüte werden hier zwei quantitative Fehlermaße verwendet. Der relative systematische Fehler berechnet sich zu

$$\text{Bias} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{x_i^* - x_i}{x_i} \quad (2)$$

wobei x_i die Beobachtung, x_i^* die Simulation und n den Stichprobenumfang darstellen. Der relative Standardfehler berechnet sich zu

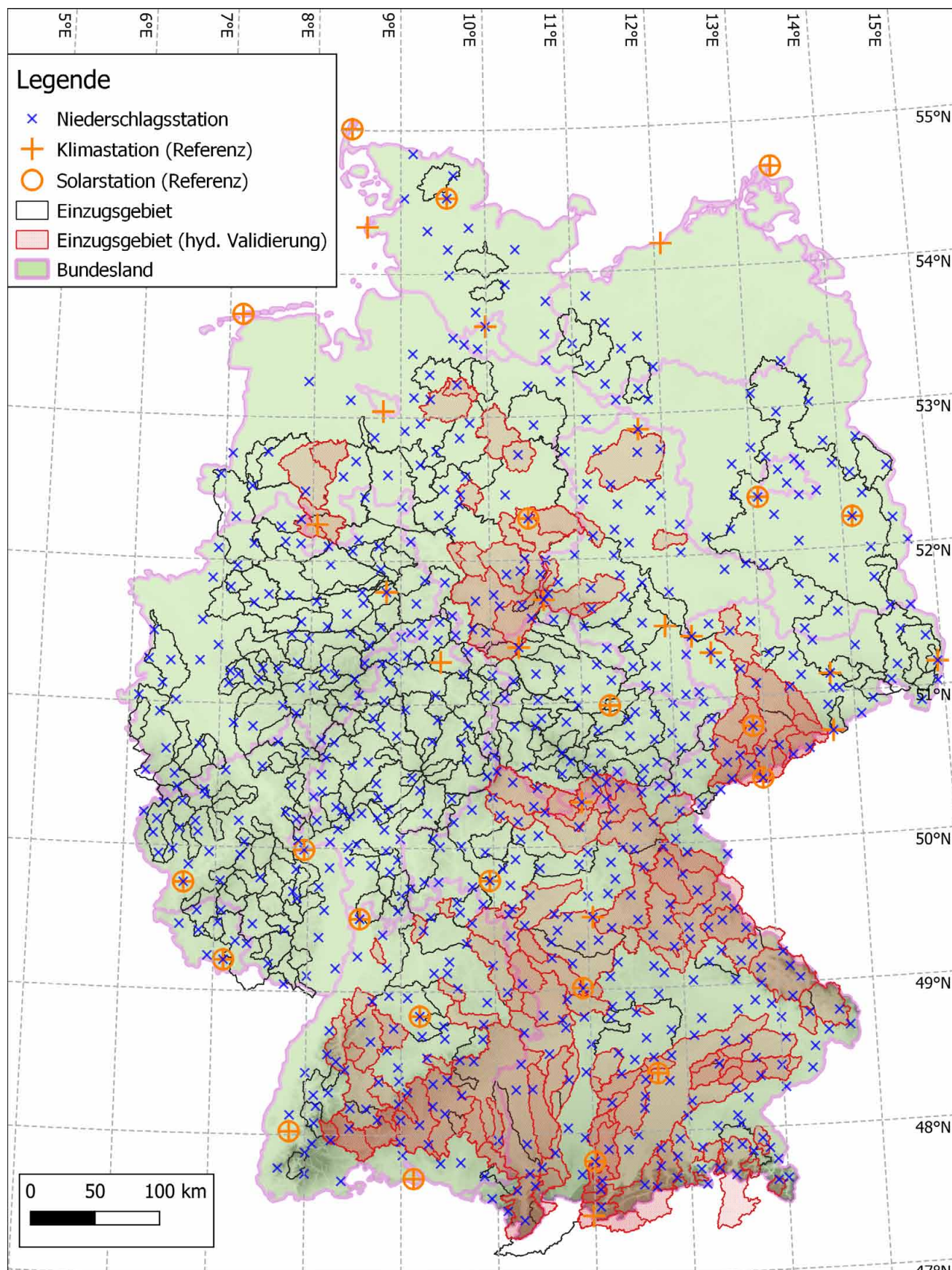
$$\text{RSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i^* - x_i}{x_i} \right)^2} \quad (3)$$

mit denselben Variablen wie in Gl. (1).

3 Untersuchungsgebiet und Daten

Die Untersuchungen erfolgten für das gesamte Gebiet von Deutschland (Abb. 3). Als Datenbasis für die Parametrisierung des univariaten Niederschlagsmodells NMOD1(t) wurden 699 registrierende Niederschlagsstationen mit einer einheitlichen Beobachtungsperiode von 15 Jahren von 2006 bis 2020 verwendet. Die räumlichen Simulationen des Niederschlags erfolgten dann mit NMOD2(u,t) für 400 mesoskalige Einzugsgebiete mit Größen zwischen 40 km² und 23.700 km². Als Datenbasis für die Generierung der täglichen Klimavariablen Temperatur, Luftfeuchte und Globalstrahlung mit WGEN(u,t) wurde der HYRAS Rasterdatensatz mit einer räumlichen Auflösung von 5 km x 5 km verwendet (RAZAFIMAHARO et al., 2020). Für die Modellierung wurden aus den Rasterdaten Gebietsmittel für die 400 Einzugsgebiete in Deutschland berechnet. Für das Resampling wurden 40 Beobachtungsjahre von 1976 bis 2015 verwendet. Zusätzlich standen 40 registrierende Klimastationen zur Verfügung (für die Globalstrahlung nur 20), die für die Validierung des Wettergenerators bzw. der Disaggregation genutzt wurden.

Für die hydrologische Validierung standen nur für 140 Einzugsgebiete ausreichende Daten zur Verfügung (hervorgehoben in Abb. 3). Dies betrifft speziell langjährige monatliche Scheitelabflüsse. Die monatlichen Scheitelabflüsse sind für alle 140 Einzugsgebiete im Zeitraum von 1971 bis 2018 verfügbar und werden für die Kalibrierung des hydrologischen Modells (HYMOD) sowie für die hydrologische Validierung des Niederschlagsmodells und des Wettergenerators berücksichtigt. Zusätzlich wurden tägliche Abflüsse im Zeitraum von 1980 bis 2002 für die Kalibrierung des hydrologischen Modells verwendet. Die Monatswerte des Bestandskoeffizienten werden mit den Landnutzungsdaten von Corine Land Cover 2006 (UMWELTBUNDESAMT, 2011) bestimmt.

**Abbildung 3**

Untersuchungsgebiet und Daten.
Study area and data.

4 Ergebnisse

4.1 Niederschlag

Zuerst wurde das univariate Niederschlagsmodell NMOD2(t) für alle 699 Stationen parametrisiert und aus den Beobachtungen die bivariaten Zusammenhangsmaße (Tab. 2) für die Zielfunktion in NMOD2(u,t) berechnet. Dann wurden für alle Stationen punktuell Niederschläge simuliert und separat für jedes Einzugsgebiet in räumliche Konsistenz gebracht. Da hier keine großskalige simultane Untersuchung der Hochwasserwahrscheinlichkeiten notwendig war, wurde die separate Optimierung pro Einzugsgebiet gewählt, welche immer noch eine bessere Güte als die globale Anwendung liefert. Aus den räumlich konsistenten Reihen wurden mit der Thiessen-Methode Gebietsniederschläge für die 400 Einzugsgebiete berechnet. Für die Validierung wurden jeweils 100 Realisationen mit 15 Jahren Länge (entsprechend

der Länge der Beobachtungen) aller Punkt- und Gebietsniederschläge verwendet.

Die Abbildung 4 zeigt einen Vergleich von beobachteten und simulierten Erwartungswerten der wesentlichen Ereignischarakteristika der punktuellen Niederschläge für alle 699 Stationen. Die meisten Charakteristika werden vom Modell sehr gut wiedergegeben. Abstriche an die Genauigkeit müssen für die Ereignisspitze WSP und die mittlere Intensität WSI gemacht werden. Beide Variablen werden vom Modell etwas überschätzt und zeigen die größte Variabilität für die 699 Stationen. Die Mediane der Standardfehler für die meisten Ereignischarakteristika liegen im Bereich von 5 %, nur für WSI ist der Fehler etwas größer. Eine saisonale Betrachtung zeigt, dass der relative Standardfehler für die Mehrzahl der Ereignischarakteristika im Sommerhalbjahr größer ist als für das Winterhalbjahr. Dies resultiert sehr wahr-

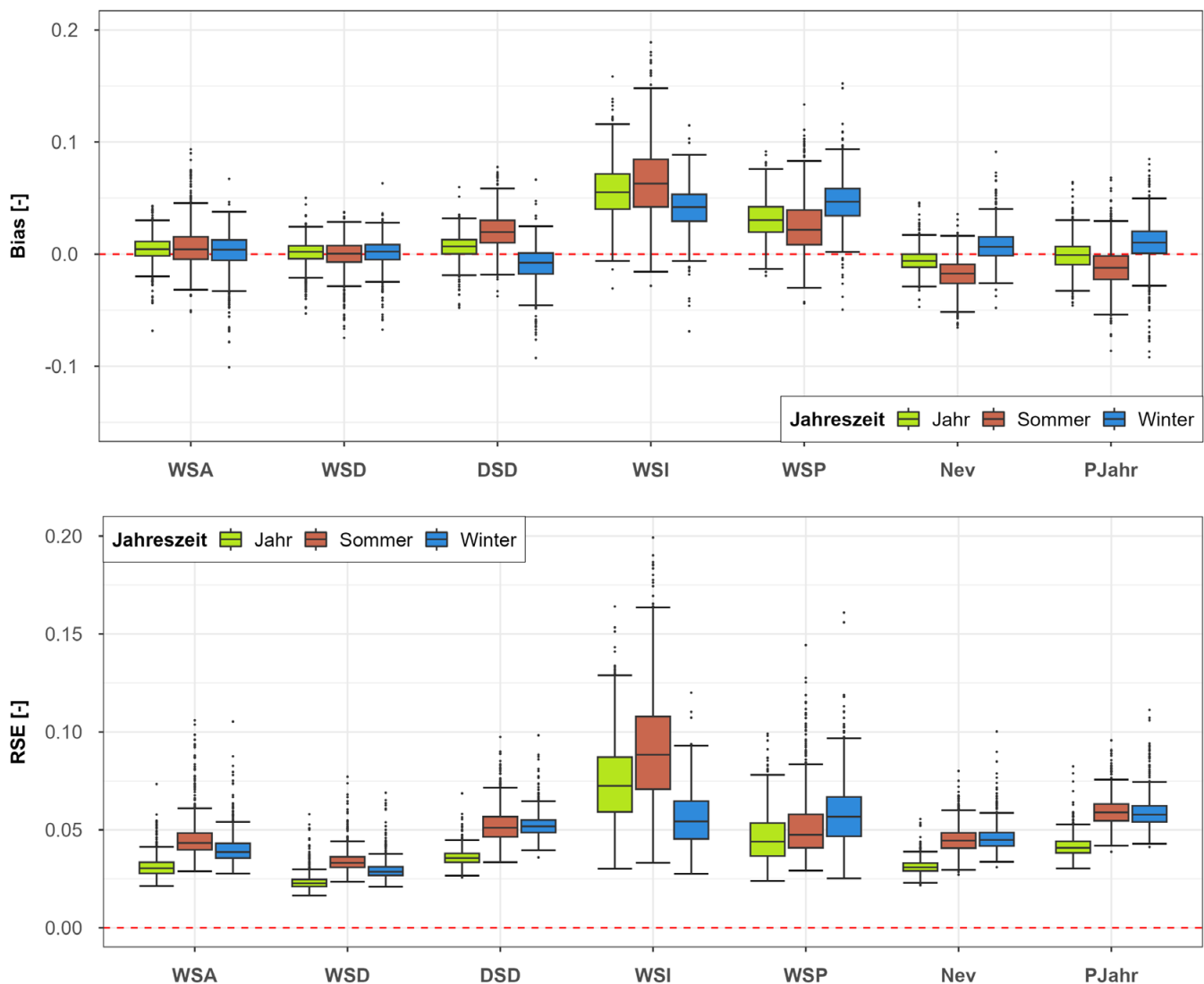


Abbildung 4

Vergleich von beobachteten und simulierten Ereignischarakteristika für die 699 Niederschlagsstationen anhand von Bias (oben) und Standardfehler (unten), WSA: Niederschlagsvolumen, WSD: Niederschlagsdauer, DSD: Trockendauer, WSI: Niederschlagsintensität, WSP: Niederschlagsspitze, Nev: Anzahl der Ereignisse, PJahr: Jahresniederschlag, Ausreißer: 3 für WSI sind außerhalb der Spannweite.
Comparison of observed and simulated event characteristics for 699 rainfall stations, (WSA: wet spell amount, WSD: wet spell duration, DSD: dry spell duration, WSI: wet spell intensity, WSP: wet spell peak, Nev: number of events per year, PJahr: mean annual rainfall; outliers: 3 for WSI are beyond range.

scheinlich aus dem mehr dynamischen, vorwiegend konvektiven Charakter der Niederschläge im Sommer.

Die Abbildung 5 zeigt beispielhaft die Güte des Resamplingverfahrens von NMOD2(u,t) anhand der medianen Korrelation über alle Realisationen und Einzugsgebiete für alle Stationspaare. Die beobachteten paarweisen Korrelationen werden gut wiedergegeben, ebenso der Unterschied zwischen Sommer und Winter. Der Scatterplot zeigt, dass die geringeren Korrelationen, die zu

den weit voneinander entfernt liegenden Stationen gehören, schlechter simuliert werden. Die anderen beiden Zusammenhangsmaße werden in ähnlicher Güte wiedergegeben, allerdings ebenfalls mit einer gewissen Unterschätzung der Bandbreite (PIDOTO & HABERLANDT, 2023).

Insbesondere für die abgeleitete Hochwasserstatistik ist die repräsentative Simulation von Starkniederschlägen wichtig. Für die Validierung wurde eine Extremwertanalyse der simulierten

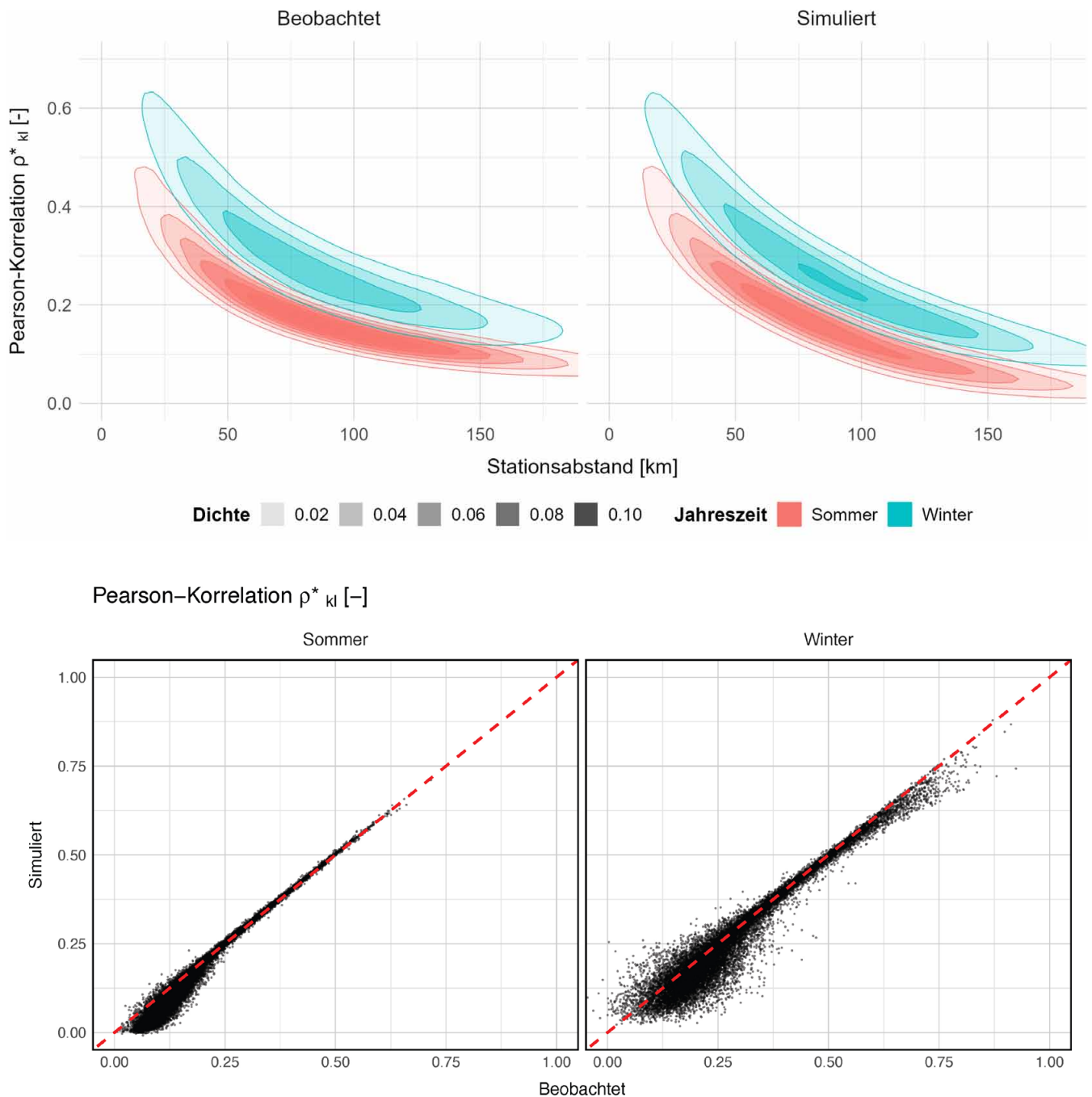


Abbildung 5

Vergleich von beobachteter und simulierter Korrelation des stündlichen Niederschlages im Sommer und im Winter als Funktion des Stationsabstandes (oben) und als Scatterplot (unten) für alle Stationspaare über alle Einzugsgebiete ($N = 19,773$).

Comparison of observed and simulated correlation of hourly precipitation in summer and winter as function of distance between stations (top) and as scatter plot (bottom) for all station pairs across all catchments ($N = 19,773$).

Gebietsniederschläge für ausgewählte Dauerstufen durchgeführt. Dafür wurde die GEV-Verteilung mit der Methode von KOUTSOYIANNIS et al. (1998) an die jährlichen Serien angepasst. Dies gewährleistet eine mehr robuste Schätzung der Extremwerte durch Zusammenfassung aller Dauerstufen und konsistente Werte über alle Dauern ohne nachgeschaltete empirische Glättungsmethoden. Trotzdem wird entsprechend der, hier als Referenz verwendeten relativ kurzen Beobachtungsreihen für die Validierung lediglich der Starkniederschlag mit einem Wiederkehrintervall bis zu $T = 20$ a verwendet. Für Prognosen können später natürlich beliebig lange Reihen erzeugt werden, die auch seltenere Starkniederschläge enthalten. Die Abbildung 6 zeigt die Güte der Reproduktion des 20-jährigen Niederschlages für ausgewählte Dauerstufen. Es ist eine systematische Abnahme des Bias mit zunehmender Dauerstufe zu erkennen. Die jährlichen Extreme werden für $D = 1$ h leicht überschätzt und ab $D = 3$ h zunehmend unterschätzt. Der Bias für Winter und Sommer unterscheidet sich nur für die kurzen Dauerstufen deutlich, so werden z. B. die Extreme für $D = 1$ h im Winter überschätzt, während sie im Sommer gut wiedergegeben werden. Ein ähnlicher Verlauf über die Dauerstufen wurde auch für die Evaluation der punktuellen Extremwertstatistik festgestellt, allerdings mit einem geringeren Bias (hier nicht gezeigt).

4.2 Andere Klimavariablen

Hier werden ausgewählte Ergebnisse für die Simulation der Klimavariablen Temperatur, Luftfeuchte und Strahlung gezeigt. Eine ausführliche Validierung für alle betrachteten Klimavariablen kann PIDOTO & HABERLANDT (2023) entnommen werden. Die Abbildung 7 zeigt einen Vergleich von beobachteten und mit WGEN(u,t) simulierten Klimavariablen. Die Saisonalität ist für alle Klimavariablen gut nachgebildet, wobei die relative Luftfeuchte die größte Variabilität zeigt. Die Autokorrelationen der täglichen Klimavariablen und ihre Kreuzkorrelationen zum Niederschlag werden vom Wettergenerator ebenfalls gut nachgebildet,

wobei beide von WGEN(u,t) leicht unterschätzt werden (hier nicht gezeigt).

Nach der Disaggregation der Klimadaten von Tages- zu Stundenwerten mit DISAG(t) wurden die simulierten Daten mit stündlichen Beobachtungen an den Standorten der Klimareferenzstationen verglichen (s. Abb. 3). Die Abbildung 8 zeigt einen Vergleich des Tagesgangs, gemittelt über alle verfügbaren Klimastationen mit stündlicher Auflösung. Strahlung und Temperatur werden sehr gut wiedergegeben, wobei die Minimal- und Maximaltemperatur unter- bzw. überschätzt werden. Für die relative Luftfeuchte müssen Abstriche an die Genauigkeit hingenommen werden, vor allem im Winter. Es wird davon ausgegangen, dass die erreichte Genauigkeit im Tagesgang der Klimavariablen für die hydrologische Simulation mit dem Zweck der abgeleiteten Hochwasserstatistik ausreichend ist.

4.3 Hochwasserabflüsse

Durch das Niederschlagsmodell und den Wettergenerator werden insgesamt Zeitreihen des Niederschlags und der zusätzlichen Klimavariablen mit einer Länge von 1.500 Jahren als Eingangsdaten für die hydrologische Modellierung zur Verfügung gestellt. Da die monatlichen Scheitelabflüsse (BEO-HQ) für einen Zeitraum von knapp 50 Jahren vorliegen, werden für die hydrologische Modellierung daraus 30 Realisationen mit einer Länge von je 50 Jahren gebildet. Zur Bewahrung akzeptabler Rechenzeiten wird von diesen 30 Realisationen zunächst nur eine Realisation zur Kalibrierung und Validierung des hydrologischen Modells verwendet. Es wurde geprüft, ob dies ausreichend ist. Ein Tausch mit anderen Realisierungen oder die Verwendung längerer Reihen führten zum selben Ergebnis. Für die eigentliche Validierung des Niederschlagsmodells und des Wettergenerators werden anschließend jedoch wieder alle 30 Realisationen eingesetzt, um die Unsicherheit der Eingangsdaten zu berücksichtigen.

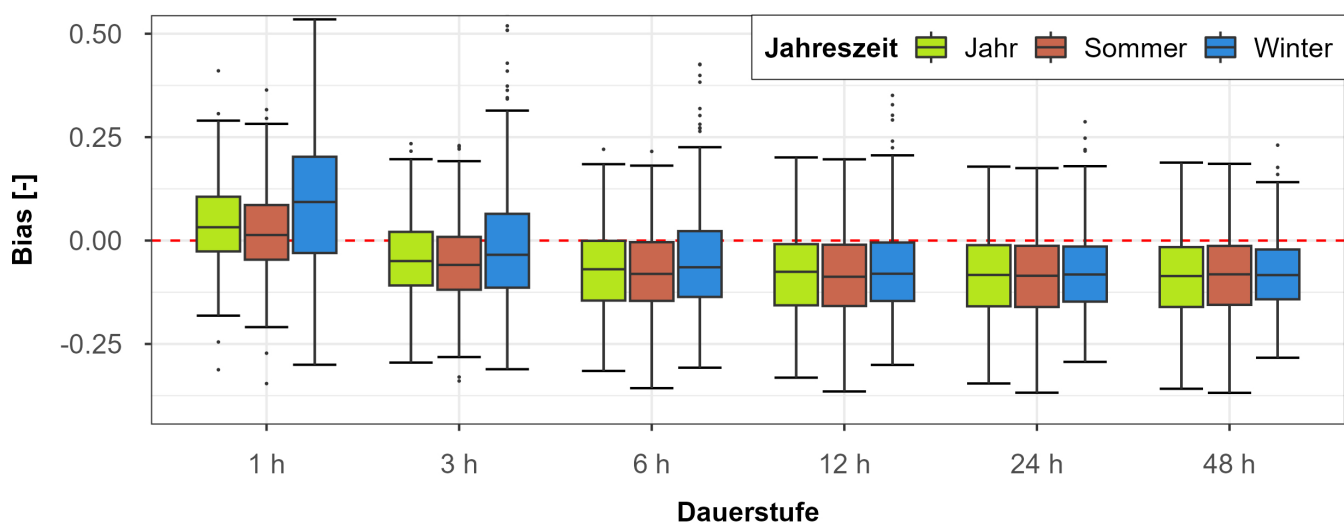
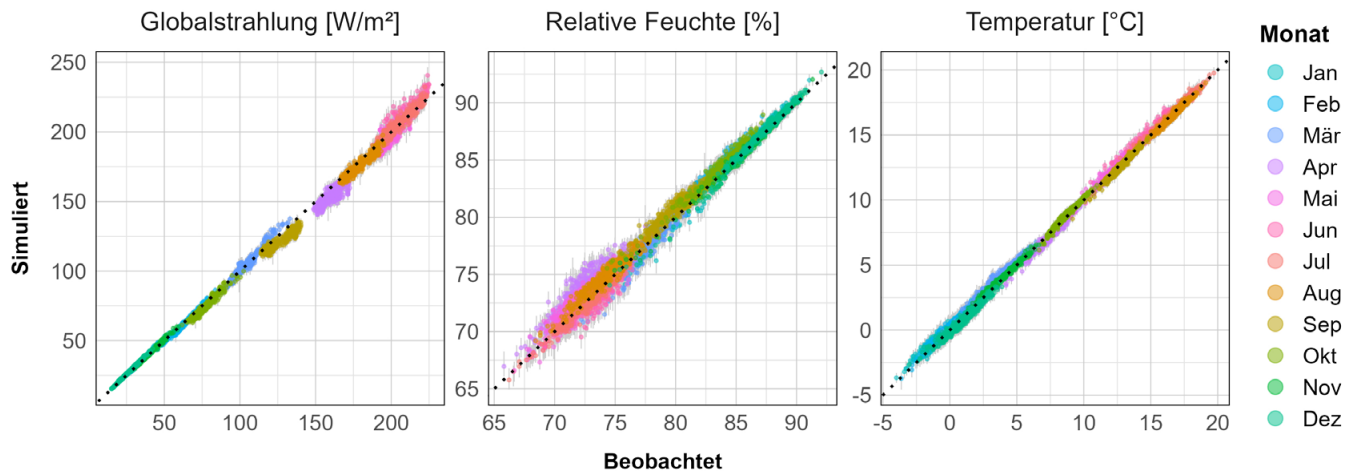


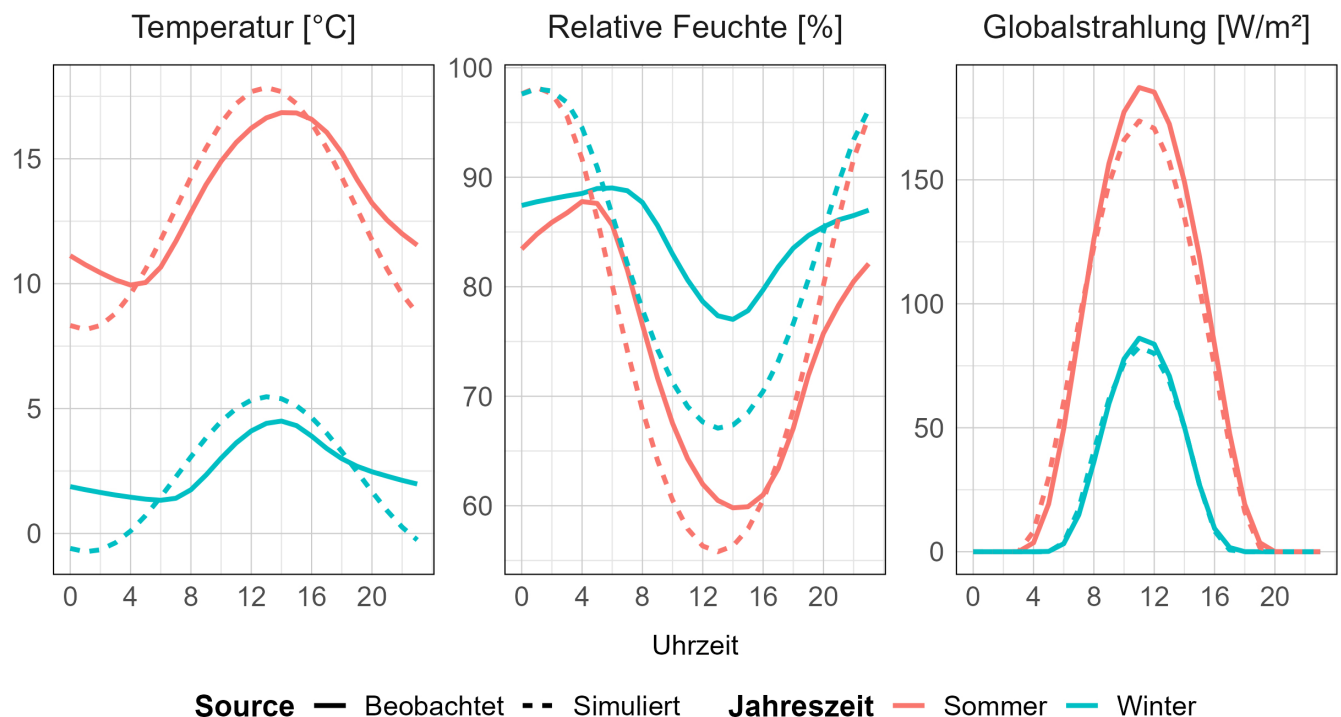
Abbildung 6

Güte für die Reproduktion des extremen Gebietsniederschlages für ausgewählte Dauerstufen mit einem Wiederkehrintervall von $T = 20$ a. Die Box-Plots zeigen den mittleren Bias über 100 Realisationen für 399 Einzugsgebiete.
Performance for the reproduction of extreme areal rainfall for selected durations with a return period of $T = 20$ yr. The box plots show the mean bias over 100 realisations for 399 catchments.

**Abbildung 7**

Vergleich von beobachteten und simulierten Monatsmittelwerten der Klimavariablen für alle Einzugsgebiete. Die Spannweiten aller Realisationen sind als graue Balken und die Mediane als farbige Punkte dargestellt.

Comparison of mean monthly values for the climate variables for all catchments. The range of all realisations is shown via grey bars and the medians as points.

**Abbildung 8**

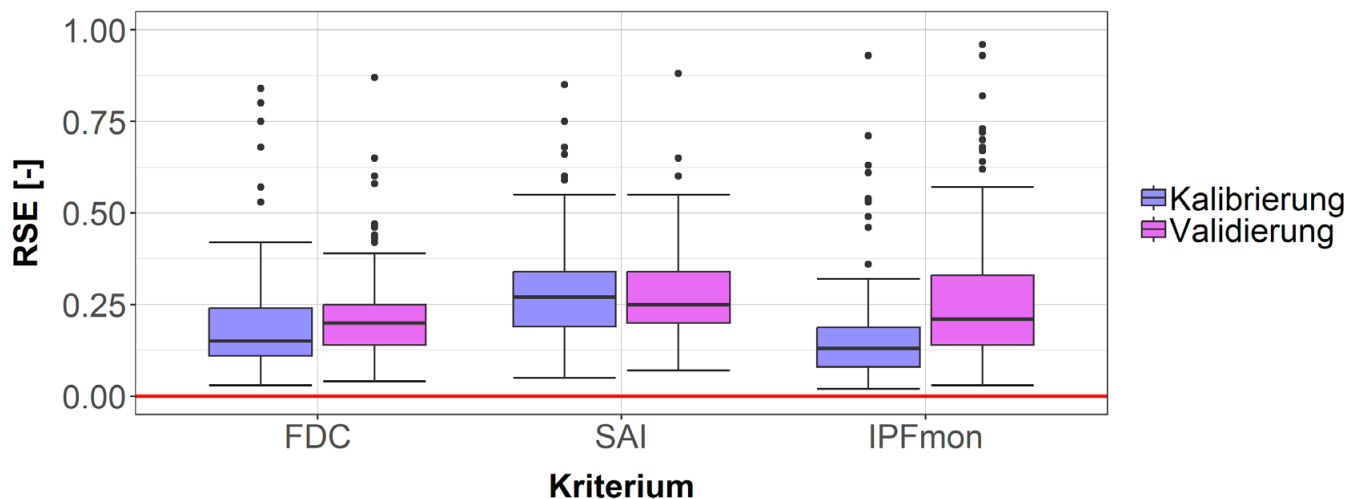
Vergleich von beobachteten und simulierten Tagesgängen der Klimavariablen für die Klimareferenzstationen (aus Abb. 2).

Comparison of observed and simulated diurnal cycles for the climate variables and for the reference climate stations.

Die Abbildung 9 zeigt den relativen Standardfehler der Zielkriterien für den Kalibrierungs- sowie den Validierungszeitraum (s. Tab. 3) für alle 140 Einzugsgebiete. Insgesamt werden die gewählten Abflussstatistiken vom hydrologischen Modell gut abgebildet. Der relative Standardfehler ist für die monatlichen Scheitelwerte (IPFmon) und die Dauerlinie (FDC) geringer als für den Jahresgang (SAI). Dies kann auf die gewählte Gewichtung der Zielkriterien zurückzuführen sein, da der Jahresgang (SAI) mit 20 % mit dem geringsten Gewicht in die Zielfunktion eingeht. Während bei der Dauerlinie (FDC) und dem Jahresgang (SAI) die

relativen Standardfehler für die Kalibrierung und Validierung sehr ähnlich sind, sind die Fehler bei den monatlichen Scheitelabflüssen (IPFmon) für den Validierungszeitraum größer als für den Kalibrierungszeitraum.

Für die Validierung des Niederschlagsmodells und des Wettergenerators wurden anschließend 30 Realisationen zu je 50 Jahren mit HBV-IWW simuliert. An die simulierten Abflüsse wurde die GEV-Verteilung für das hydrologische Jahr (November bis Oktober) sowie für das Sommer- und das Winterhalbjahr ange-


Abbildung 9

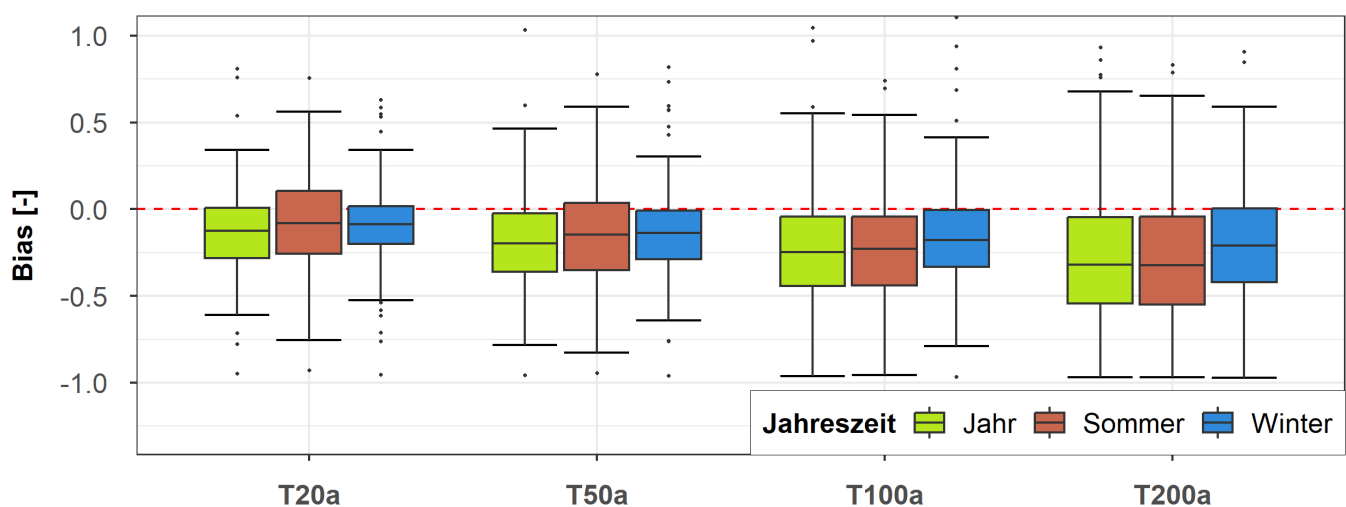
Validierung von HBV anhand von Abflussstatistiken für 140 Einzugsgebiete mit einer Realisation von Niederschlag und Klima, 6 Ausreißer außerhalb der Spannweite.

Validation of HBV based on flow statistics for 140 catchments using one realisation of precipitation and climate, 6 outliers outside of the range.

passt. Dies bedeutet zwar die Einführung eines weiteren Modells hat aber im Vergleich zur Verwendung der empirischen Verteilungsfunktion den Vorteil, dass speziell bei kurzen Reihen einzelne Ausreißer geglättet werden. Die Abbildung 10 zeigt die Güte der Reproduktion der Extremwerte für verschiedene Jährlichkeiten anhand des Bias. Der Bias nimmt mit dem Wiederkehrintervall zu und zeigt die typische Unterschätzung der Hochwasser durch die Modellierung. Er ist für die größeren Jährlichkeiten im Winter etwas höher als im Sommer. Die Tabelle 4 zeigt die Mittelwerte des Bias und des RSE für die Schätzung der jährlichen Hochwasserabflüsse mit Wiederkehrintervallen von 20 bis 200 Jahren. Die Extremwerte können insgesamt mit mittleren Fehlern $\leq 35\%$ bis zum HQ_{100} gut durch die hydrologische Modellierung abgebil-

det werden. Auch hier ist zu erkennen, dass die Fehler mit zunehmendem Wiederkehrintervall größer werden. Der mittlere Bias ist mit Werten kleiner als 20 % bis zum HQ_{100} grundsätzlich akzeptabel.

Die 140 berücksichtigten Einzugsgebiete unterscheiden sich deutlich hinsichtlich ihrer Einzugsgebietseigenschaften. Somit bestand eine Frage darin, inwieweit diese Eigenschaften im Zusammenhang zur Modellgüte für die abgeleitete Hochwasserstatistik stehen. Die Abbildung 11 zeigt den Zusammenhang zwischen Modellgüte am Beispiel des HQ_{100} und ausgewählten Gebietseigenschaften. Aus den Bildern sind kaum Zusammenhänge ableitbar. Es ist lediglich zu sehen, dass die größten Ein-


Abbildung 10

Validierung des Niederschlagsmodells und des Wettergenerators anhand der abgeleiteten Hochwasserstatistik. Die Boxplots enthalten die Mediane des relativen systematischen Fehlers (BIAS) über 30 Realisationen der Klimadaten für 140 Einzugsgebiete, 27 Ausreißer sind außerhalb der Spannweite.

Validation of the precipitation model and the weather generator based on the derived flood statistics. The boxplots contain medians of the relative systematic error (bias) over 30 realisations of the climate data for 140 catchments, 27 outliers are outside of the range.

Tabelle 4						
Mittlerer Fehler für die Schätzung der HQ_T für 140 Einzugsgebiete . <i>Mean errors for the estimation of HQ_T for 140 catchments.</i>						
	Bias [-]			RSE [-]		
	Jahr	Sommer	Winter	Jahr	Sommer	Winter
HQ_{20}	-0.1337	-0.0702	-0.0923	0.2161	0.2437	0.1825
HQ_{50}	-0.1743	-0.1333	-0.1241	0.287	0.2903	0.2383
HQ_{100}	-0.1993	-0.1766	-0.1396	0.3485	0.3546	0.2921
HQ_{200}	-0.2079	-0.2191	-0.1407	0.4443	0.4573	0.3754

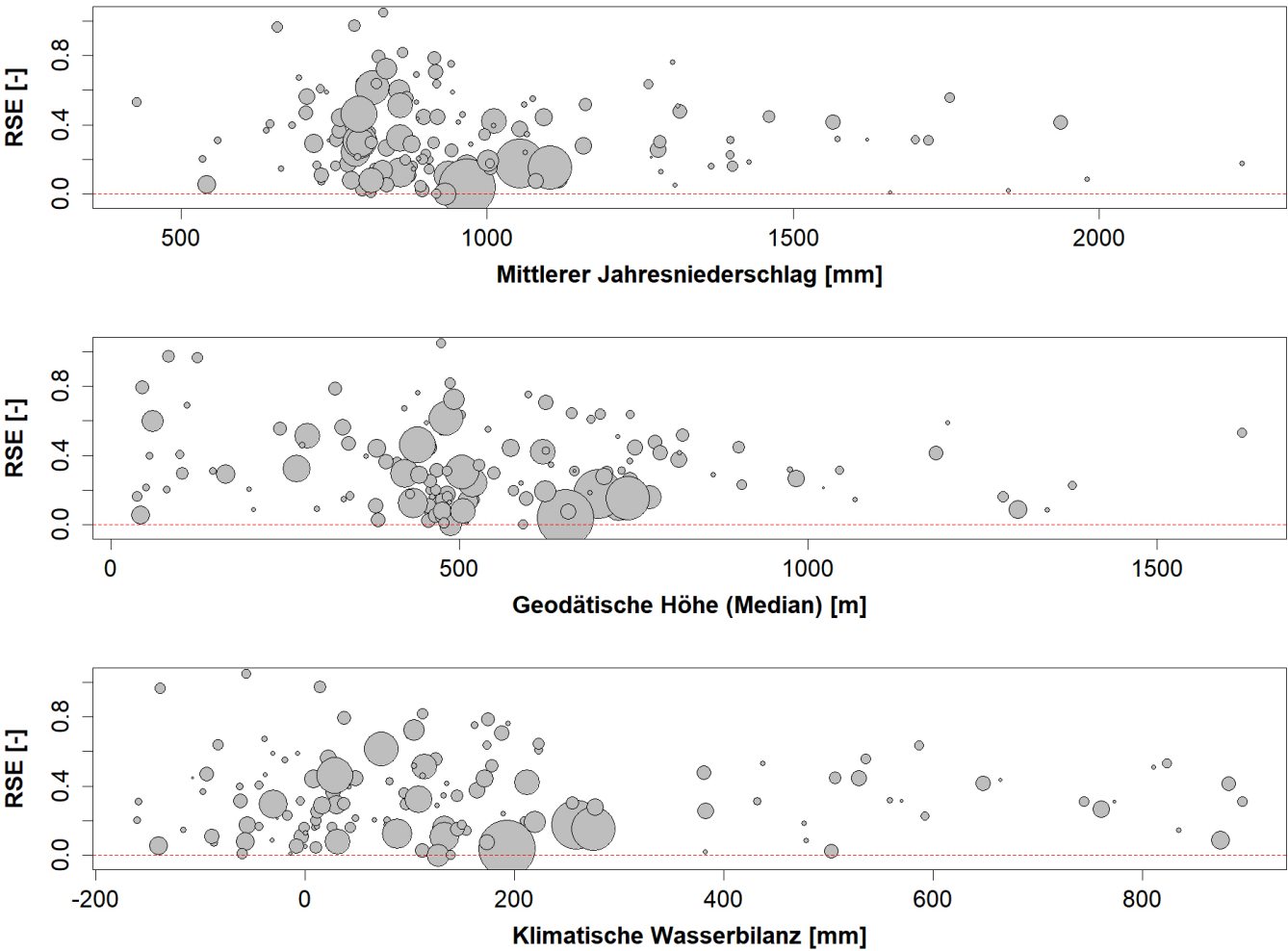


Abbildung 11
Zusammenhang zwischen Modellgüte und Einzugsgebieteigenschaften: mittlerer jährlicher Niederschlag, Geodätische Höhe und klimatische Wasserbilanz für die Simulation des jährlichen HQ_{100} anhand des medialen Bias über 30 Realisationen. Die Symbolgröße ist proportional zur Gebietsgröße.
Relationship between model performance and catchment characteristics: mean annual precipitation, mean elevation and climatic water balance for the simulation of annual HQ_{100} using the median bias over 30 realisations. The size of the symbols is proportional to the catchment areas.

zugsgebiete relativ kleine Fehler haben und die größten Fehler eher zu trockenen Einzugsgebieten gehören. Dies ist ein relativ typisches Bild in der hydrologischen Modellierung.

In der Abbildung 12 ist der Bias für die simulierten HQ_{100} räumlich dargestellt. Die Unterschätzungen des HQ_{100} treten überall auf, die Überschätzungen dagegen vorwiegend in einer Region im Süden von Deutschland. Die größten Über- und Unter-

schätzungen sind eher bei den kleineren Einzugsgebieten zu finden.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Mit den vorliegenden Untersuchungen wurde ein Framework zur abgeleiteten Hochwasserstatistik vorgestellt, welches im Rahmen der DFG-Forschungsgruppe SPATE (Space-Time

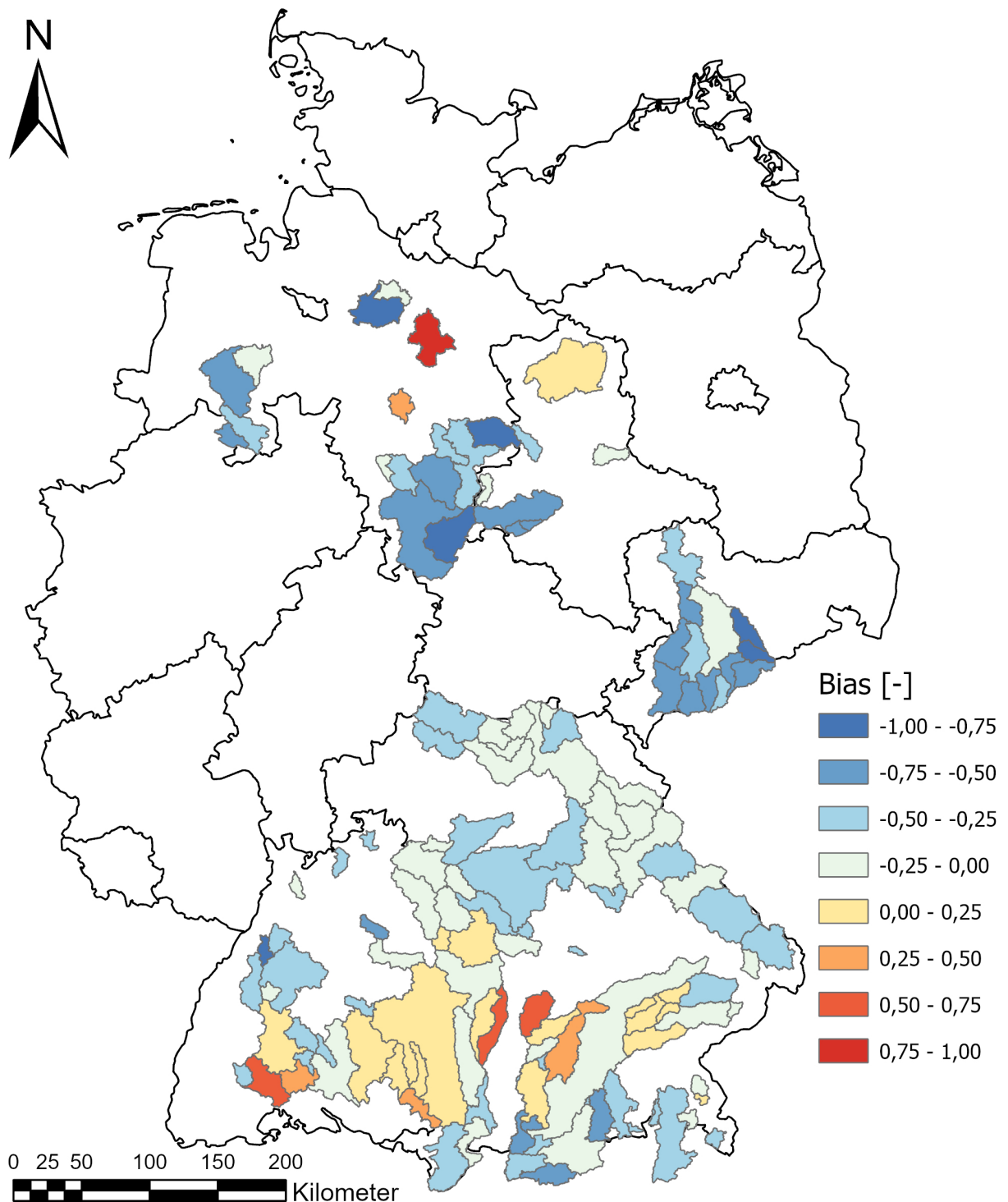


Abbildung 12
 Räumliche Verteilung des Bias für die Schätzung des HQ_{100} als Median über 30 Realisierungen.
Spatial distribution of the median bias for the estimation of HQ_{100} over 30 realisations.

Dynamics of Extreme Floods) entwickelt wurde. Die Kernelemente des Frameworks sind ein stochastisches Niederschlagsmodell, ein Wettergenerator zur Simulation von Temperatur, Globalstrahlung und Luftfeuchte sowie ein hydrologisches Modell mit spezieller Kalibrierungsstrategie. Innovativ sind speziell die gleichzeitig multivariate, zeitlich hoch aufgelöste, kontinuierliche und skalenübergreifende Niederschlags-

modellierung, die Kopplung des Niederschlagsmodells mit einem zeitlich hoch aufgelöstem Wettergenerator und eine neue Kalibrierungsstrategie für die abgeleitete Hochwasserstatistik.

Die Validierung der Elemente des Frameworks erfolgte auf Basis von Niederschlagsseigenschaften und simulierter Hochwassersta-

tistik für eine Vielzahl von Einzugsgebieten in Deutschland. Die Einzugsgebiete weisen Größen von 40 km² bis 23.700 km² auf mit Anzahlen von Niederschlagsstationen zwischen 1 und 87. Dies zeigt die erforderliche Flexibilität des Niederschlagsmodells für unterschiedliche Skalen, d. h. speziell die Funktionsfähigkeit des genesteten Resamplings zur Erlangung räumlicher Konsistenz des Niederschlages. Für die Simulation des HQ100 wurden ein mittlerer RSE von 34,8 % und ein mittlerer Bias von -19,9 % erhalten. Dies ist im Vergleich mit vorherigen Studien ein akzeptabler Fehler (DING et al., 2016; KAHILI et al., 2011; LI et al., 2017; WINTER et al., 2019), wobei hier wesentlich mehr Einzugsgebiete über einen größeren Maßstabsbereich untersucht wurden.

Aktuelle Limitierungen des Ansatzes betreffen einerseits die Nachbildung mehr komplexer Niederschlagseigenschaften wie Advektion und multivariate räumliche Beziehungen und andererseits die rein stationäre Simulation für gegenwärtiges Klima. Ersteres könnte behoben werden, durch Entwicklung eines multidimensionalen Raster-basierten Niederschlagsmodells, welches Radarniederschläge zur Parametrisierung verwendet. Letzteres, die stationäre Simulation, ist typisch für Niederschlagsmodelle und Wettergeneratoren. Zur Simulation von Zeitreihen des zukünftigen Klimas muss eine Re-Parametrisierung des Wettergenerators erfolgen. Dies kann einerseits über eine zukünftige Referenzdatenbasis z. B. von einem hochauflösenden numerischen Wettermodell oder andererseits über eine bedingte Parameterschätzung anhand von Klimaindizes erfolgen. Eine Parametrisierung des Wettergenerators in Abhängigkeit von Großwetterlagen wird gegenwärtig implementiert.

Mit dem hier vorgestellten Framework steht ein Werkzeug zur Verfügung, mit welchem im nächsten Schritt detaillierte Analysen zur Vorhersagbarkeit von Hochwasserwahrscheinlichkeiten gemacht werden können. Dies betrifft speziell die Quantifizierung von Unsicherheiten für die Prognose der HQ-Extremwertverteilungen in Abhängigkeit von Einzugsgebieteigenschaften und Klima.

Conclusions and outlook

This study has presented a framework for derived flood frequency analysis, having been developed within the research unit SPATE (Space-Time Dynamics of Extreme Floods). The core elements of the framework are a stochastic precipitation model, a weather generator for the simulation of temperature, global radiation and humidity, as well as a hydrological model and respective calibration strategy. Novel in this study is the precipitation model mutually incorporating a high temporal resolution, multi-site rainfall generation, continuous modelling and multiple spatial scales. Also, the coupling of the precipitation model with a high temporal resolution weather generator and a new the calibration strategy for derived flood frequency analyses are innovative.

The validation of the elements of the framework is based on precipitation characteristics and simulated flood statistics for numerous catchments in Germany. The catchments vary in size from 5 km² to 23.715.00 km² with numbers of rainfall stations between 1 and 87. This shows the required flexibility of the precipitation model for different scales i.e., especially the working of the nested resampling approach to reach spatial consistency. For the simulation of HQ100, a mean RSE of 34.8 % and a mean bias

of -19.9 % were obtained. Compared to previous studies (DING et al., 2016; KAHILI et al., 2011; LI et al., 2017; WINTER et al., 2019), this error is considered reasonable especially considering the greater number of catchments over a much larger spatial scale.

Current limitations of the framework concern the simulation of more complex rainfall structures like advection and multivariate spatial relationships as well as non-stationary simulations. The former could be addressed by developing a multidimensional raster-based precipitation model parameterized using radar data. The latter is typical for weather generators and precipitation models. An application for future climate would require a re-parameterization of the weather generator. This can be done either by using a future reference data set e.g., from a high resolution climate model or by conditioning the weather generator on climate indices. A parameterization of the weather generator conditioned on circulation patterns is currently being implemented.

Given the availability of this newly developed framework, future studies to analyse the predictability of flood probabilities may be performed. This concerns especially the analyses of uncertainties for the prediction of HQ extreme value distributions in relation to catchment characteristics and climate.

Datenverfügbarkeit

Die Analysen basierend auf frei verfügbaren Niederschlags- und Klimadaten des DWD (https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/). Die Abflussdaten stammen von Landesbehörden und sind in der Regel nicht frei verfügbar. Die synthetisch erzeugten Niederschlags- und Klimazeitreihen sind relevant für die aktuelle Validierung des Frameworks aber aufgrund von aktuellen Weiterentwicklungen von zu geringem Nutzen für eine permanente Archivierung in einem Datenrepositorium. Die entwickelten Softwareprogramme für die Wetter- und Niederschlagsgenerierung können bei Ross Pidoto angefragt werden.

Danksagung

Wir danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung unseres Projektes im Rahmen der DFG-Forschergruppe 2416 "Space-time Dynamics of Extreme Floods SPATE". Außerdem wird den zwei anonymen Gutachtern gedankt, die mit ihren nützlichen Hinweisen zur Verbesserung des Artikels beigetragen haben.

Anschrift der Verfasser

Prof. Dr.-Ing. Uwe Haberlandt
Ross Pidoto, M.Sc.
Luisa-Bianca Thiele, M.Sc.
Dr.-Ing. Anne Bartens (geb. Fangmann)
Leibniz Universität Hannover
Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft
Appelstr. 9a, 30167 Hannover
haberlandt@iww.uni-hannover.de
pidoto@iww.uni-hannover.de
thiele@iww.uni-hannover.de
fangmann@iww.uni-hannover.de

Literaturverzeichnis

APIPATTANAVIS, S., G. PODESTÁ, B. RAJAGOPALAN & R.W. KATZ (2007):
A semiparametric multivariate and multisite weather generator.
Wat. Resour. Res., 43: W11401. DOI:10.1029/2006WR005714.

- BÁRDOSSY, A. (1998): Generating precipitation time series using simulated annealing. *Water Resources Research*, 34(7): 1737-1744.
- CALLAU PODUJE, A.C. & U. HABERLANDT (2017): Short time step continuous rainfall modeling and simulation of extreme events. *Journal of Hydrology*, 552: 182-197.
- CAMERON, D.S., K.J. BEVEN, J. TAWN, S. BLAZKOVA & P. NADEN (1999): Flood frequency estimation by continuous simulation for a gauged upland catchment (with uncertainty). *Journal of Hydrology*, 219 (3-4): 169-187.
- CARAWAY, N.M., J.L. MCCREIGHT & B. RAJAGOPALAN (2014): Multisite stochastic weather using cluster analysis and k-nearest neighbor time series resampling. *Journal of Hydrology*, 508(0): 197-213.
- CHEN, J., F. BRISSETTE & X. ZHANG (2015): Hydrological Modeling Using a Multisite Stochastic Weather Generator. *Journal of Hydrologic Engineering*, 21(2): 04015060.
- DING, J. & U. HABERLANDT (2015): Estimation of instantaneous peak flow from maximum daily flow – a comparison of three methods. *Hydrology Research*, 46(5): DOI: 10.2166/nh.2014.085.
- FÖRSTER, K., F. HANZER, B. WINTER, T. MARKE & U. STRASSER (2016): An open-source MEteoroLOgical observation time series DISaggregation Tool (MELODIST v0.1.1). *Geosci. Model Dev.*, 9(7): 2315-2333.
- FATICHI, S., V.Y. IVANOV & E. CAPORALI (2011): Simulation of future climate scenarios with a weather generator. *Advances in Water Resources*, 34(4): 448-467.
- GRIMALDI, S., E. VOLPI, A. LANGOUSIS, S. MICHAEL PAPALEXIOU, D. LUCIANO DE LUCA, R. PISCOPIA, S.D. NERANTZAKI, G. PAPACHARALAMPOUS & A. PETROSELLI (2022): Continuous hydrologic modelling for small and ungauged basins: A comparison of eight rainfall models for sub-daily runoff simulations. *Journal of Hydrology*, 610: 127866.
- HABERLANDT, U., Y. HUNDECHA, M. PAHLOW & A. SCHUMANN (2011): Rainfall generators for applications in flood studies. In: Schumann, A. (Ed.), *Flood Risk Assessment and Management*. Springer, pp. 117-147.
- HABERLANDT, U. & I. RADTKE (2014): Hydrological model calibration for derived flood frequency analysis using stochastic rainfall and probability distributions of peak flows. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18: 353-365.
- HEISTERMANN, M. & D. KNEIS (2011): Benchmarking quantitative precipitation estimation by conceptual rainfall-runoff modeling. *Water Resour. Res.*, 47(6): W06514.
- HOSKING, J.R.M. & J.R. WALLIS (1997): *Regional frequency analysis: an approach based on L-moments*. Cambridge University Press, New York.
- KOUTSOYIANNIS, D., D. KOZONIS & A. MANETAS (1998): A mathematical framework for studying rainfall intensity-duration-frequency relationships. *Journal of Hydrology*, 206(1-2): 118-135.
- KHALILI, M., F. BRISSETTE & R. LECONTE (2011): Effectiveness of multi-site weather generator for hydrological modeling 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 47. Jg., Nr. 2, S. 303-314.
- LALL, U. & A. SHARMA (1996): A nearest neighbor bootstrap for resampling hydrological time series. *Wat. Resour. Res.*, 32: 679-693.
- LAMB, R. (1999): Calibration of a conceptual rainfall-runoff model for flood frequency estimation by continuous simulation. *Water Resour. Res.*, 35(10): 3103-3114.
- LI, Z., Z. LÜ, J. LI & S. XIAOPING (2017): Links between the spatial structure of weather generator and hydrological modeling. *Theor Appl Climatol* 128, 103–111. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1691-8>.
- ONOF, C., R.E. CHANDLER, A. KAKOU, P. NORTHROP, H.S. WHEATER & V. ISHAM (2000): Rainfall modelling using Poisson-cluster processes: A review of developments. *Stochastic Environ. Res. Risk Assess.*, 14: 384-411.
- ONOF, C. & L.P. WANG (2020): Modelling rainfall with a Bartlett-Lewis process: new developments. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 24(5): 2791-2815.
- PAPALEXIOU, S.M., F. SERINALDI & M.P. CLARK (2023): Large-Domain Multisite Precipitation Generation: Operational Blueprint and Demonstration for 1,000 Sites. *Water Resources Research*, 59(3): e2022WR034094.
- PELEG, N. & E. MORIN (2014): Stochastic convective rain-field simulation using a high-resolution synoptically conditioned weather generator (HiReS-WG). *Water Resources Research*, 50(3): 2124-2139.
- PIDOTO, R. & U. HABERLANDT (2023): A semi-parametric hourly space-time weather generator. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 2023: 1-28.
- RAZAFIMAHARO, C., S. KRÄHENMANN, S. HÖPP, M. RAUTHE & T. DEUTSCHLÄNDER (2020): New high-resolution gridded dataset of daily mean, minimum, and maximum temperature and relative humidity for Central Europe (HYRAS). *Theoretical and Applied Climatology*, 142(3): 1531-1553.
- UMWELTBUNDESAMT (2011): CORINE Land Cover Aktualisierung 2006 für Deutschland. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- VRUGT J.A. & B.A. ROBINSON (2007): Improved evolutionary optimization from genetically adaptive multimethod search. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 104, 708–711. DOI:10.1073/pnas.0610471104.
- WALLNER, M., U. HABERLANDT & J. DIETRICH (2013): A one-step similarity approach for the regionalization of hydrological model parameters based on Self-Organizing Maps. *Journal of Hydrology*, 494: 59-71.
- WALLNER, M. & U. HABERLANDT (2015): Klimabedingte Änderung von Hochwasserabflüssen im Aller-Leine-Einzugsgebiet – eine Fallstudie mit HBV-IWW. *Hydrologie & Wasserbewirtschaftung*, 59(4): 174-183.
- WENDLING, U., H.-G. SCHELLIN & M. THOMAE (1991): Bereitstellung von täglichen Informationen zum Wasserhaushalt des Bodens für die Zwecke der agrarmeteorologischen Beratung, *Z. Meteorologie*, 41, 468–474.
- WINTER, B., K. SCHNEEBERGER, N.V. DUNG, M. HUTTENLAU, S. ACHLEITNER, J. SÖTTER, B. MERZ & S. VOROGUSHYN (2019): A continuous modelling approach for design flood estimation on sub-daily time scale, *Hydrological Sciences Journal*, 64:5, 539-554. DOI: 10.1080/02626667.2019.1593419

Aktuelles

Unter- und Überwasserkartierung von Flüssen und Seen

Die präzise Vermessung von Gewässern ist anspruchsvoll. Behörden und Hafenbetreiber sind verpflichtet, aktuelle Karten von Flussbetten oder Hafenanlagen bereitzustellen. Die Kartierung erfordert bis dato spezielle Kartierungsschiffe und hohen Personalaufwand. Sie ist kostenintensiv und erfolgt nicht in der Häufigkeit und Präzision, die für künftige Anwendungen, wie den autonomen Schiffverkehr, nötig sein werden. Ein Forscherteam des Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung, IOSB hat deshalb ein handliches, unbemanntes Wasserfahrzeug entwickelt, das Gewässer wie Flüsse, Seen und Häfen über und unter der Wasseroberfläche autonom vermisst und die zugehörigen 3D-Karten anfertigt.

Gewässerkarten liefern wichtige Informationen – etwa über die Gewässertiefe, die Boden- und Uferbeschaffenheit, die Sohlenstruktur, das Längs- und Querprofil, Angaben zur Böschung, zu anliegenden Flurstücken, zu Hafenanlagen und Brückenbauten, zum Gewässerzustand und vieles mehr. Diese Karten müssen regelmäßig von den zuständigen Behörden erhoben und aktualisiert werden, was mit hohem Kostenaufwand verbunden ist, da die Vermessung der Gewässer aktuell mithilfe von Fachkräften auf Kartierungsschiffen manuell durchgeführt wird. Deutlich günstiger lässt sich die Unter- und Überwasserkartierung mit autonomen Wasserfahrzeugen realisieren. Ein solches System haben Forschende des Fraunhofer IOSB in Karlsruhe im Projekt TAPS (Teilautomatisches Peilsystem für Flüsse und Seen) auf Basis eines kommerziellen USV (unmanned surface vessel) entwickelt. Lediglich mit einem zentralen Arbeitsplatz bzw. einem Leitstand an Land verbunden, kartiert das Messboot alle Arten von Binnengewässern und deren Umgebung, wobei die Vermessung sowohl über als auch unter der Wasseroberfläche stattfindet. Ein küstennaher Einsatz ist ebenso denkbar: Die Kartierung ist in der derzeitigen Ausführung bis zu einer Tiefe von 100 m möglich.

Ausgestattet mit GPS-, Beschleunigungs- und Drehratensensoren sowie einem Doppler Velocity Log (DVL), einem Sensor, der das Boot befähigt, sich inkrementell am Gewässerboden entlangzutasten, ist das Boot in der Lage, sich autonom fortzubewegen. Für die Orientierung des teilautomatischen Peilsystems werden die Sensordaten fusioniert. Für die Kartierung über Wasser kommen Laserscanner und Kameras in Kombination mit einer am Fraunhofer IOSB entwickelten Kartierungssoftware zum Einsatz – die Geräte rekonstruieren hochpräzise 3D-Modelle der Umgebung. Die Unterwasserkartierung wiederum erfolgt mithilfe eines in die Sensorik integrierten Multibeam-Sonars, das ein komplettes 3D-Modell des Grunds erstellt. Das Peilsystem ist insofern teilautomatisch, als der Anwender nur noch den zu kartierenden Bereich vorgeben muss. Die Vermessung selbst erfolgt vollautomatisch, die Datenauswertung erfordert nur wenige Mausklicks. Die für die Kartierung und das autonome Fahren erforderlichen Softwaremodule wurden desgleichen von den IOSB-Forschern entwickelt.

Zunächst wird der Bereich vorgegeben, der vermessen werden soll. Die Software berechnet darauf basierend die Route. Im nächsten Schritt startet das USV, das 2m x 1,5m x 1m misst

und mit 64 kg ein Leichtgewicht ist. Auf seiner Mission weicht es Hindernissen, die der Laserscanner und das Sonar erfassen, selbstständig aus. Während der Fahrt wird für Navigationszwecke ein schnelles 3D-Modell in Echtzeit erstellt, einschließlich dynamischer Objekte wie fahrender Schiffe. Ein zweites hochpräzises 3D-Modell berechnet die Software nach der Datenauswertung, wobei sowohl die Gewässersohle, als auch die über der Wasseroberfläche liegende Szene erfasst wird, bewegliche Objekte aber ausgeblendet werden.

Die Tests mit dem Messboot fanden auf verschiedenen Seen statt. Der einsatzfähige Prototyp wird derzeit von der Fraunhofer-Forschungsgruppe »Smart Ocean Technologies SOT« in Rostock in weiteren Projekten mit dem Schwerpunkt Unter- und Überwasserrobotik genutzt.

Die Anwendungsperspektiven der entwickelten Technologie sind vielfältig. Neben dem autonomen Vermessen von Fahrrinnen und baulichen Strukturen ist etwa auch das autonome Ausheben von Wasserfahrstraßen denkbar. Aber auch, wer nur autonom auf Gewässern navigieren möchte, ohne diese zu kartieren, kann den im Projekt entwickelten Software-Stack nutzen. Deshalb sieht man letztlich Einsatz- bzw. Weiterentwicklungsmöglichkeiten für alle Bereiche des Personen- und Gütertransports auf hoher See und auf Binnengewässern. Künftig wird der autonome Schiffsverkehr auf deutschen Wasserstraßen massiv zunehmen – bis hin zu neuartigen Logistikketten, die Schiene, Straße und Wasser intelligent kombinieren.

Autonomer Schiffsverkehr erfordert neben Autonomiealgorithmen aber eben auch sehr präzise Karten, die bis heute mitunter fehlten. Die manuellen Vermessungsfahrten finden derzeit nur im Ein- bis Zwei-Jahres-Rhythmus statt und liefern im Vergleich zu den umfassenden 3D-Modellen deutlich weniger präzise Ergebnisse, sodass der Zustand der Wasserstraßen nicht optimal erfasst wird. Die Vermessung der Flüsse muss daher künftig in einer wesentlich höheren Frequenz mit einem höheren Detailgrad erfolgen. Unser teilautomatisches Peilsystem bietet hier eine kostengünstige Alternative zu aktuellen Vermessungsmethoden.

Weitere Informationen:

Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung, IOSB
<https://www.iosb.fraunhofer.de/>

(aus: Pressemitteilung Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung vom 3. Juli 2023)

Veränderungen beim Salzgehalt des Wassers gefährden Weltmeere und Biodiversität

Ein internationales Forschungsteam legt die kritische und doch wenig erforschte Rolle des Salzgehaltes im Wasser, der sogenannten Salinität, in einem sich verändernden Ozean und entlang der Küsten offen. Seine Studie verdeutlicht nicht nur die Auswirkungen der Salinitätsveränderungen auf die Gesundheit und Funktion von Ökosystemen, sondern beschreibt auch zu erwartenden Schäden für Küstengemeinden. Leiter der Studie sind

Wissenschaftler vom Fraunhofer-Institut für Molekularbiologie und Angewandte Ökologie in Gießen.

Die Arbeit zeigt, dass Salinitätsveränderungen ein bedeutendes, jedoch unzureichend erforschtes Problem darstellen. Die Wissenschaft ist recht gut darüber informiert, wie sich veränderte Temperaturen, pH-Werte und Nährstoffe auf Ozean- und Küstenökosysteme auswirken. Jedoch wurden die Auswirkungen menschengemachter Salinitätsveränderungen bisher stark vernachlässigt - obwohl die Salzbelastung für alle Arten von Organismen, einschließlich Pflanzen, Tieren und Mikroorganismen, entscheidend ist.

Besonders anfällig für Salinitätsveränderungen sind Ökosysteme entlang der Küste und Flussmündungen, die für ihre hohe Produktivität bekannt sind. Die Studie hebt hervor, dass klimabedingte Veränderungen des Niederschlags zu extremen Hochwasser- und Dürreereignissen führen können, was wiederum die Verfügbarkeit von Süßwasser beeinträchtigt und diese sensiblen Ökosysteme belastet. Zusätzlich betonen die Forscher verstärkende Effekte lokaler menschlicher Aktivitäten wie Veränderungen der Landnutzung, Urbanisierung, Flussregulierung und terrestrische Entwässerung, die den Stress besonders für Küstenregionen weiter verschärfen.

Salinität ist ein zentraler Faktor für viele Stoffwechselprozesse, und die meisten marinen Organismen sind darauf ausgelegt, in Umgebungen mit recht stabilem Salzgehalt zu leben. Die Salinität interagiert auch mit anderen physikalischen und chemischen Parametern wie Temperatur und Sauerstoffgehalt und prägt so die physikalische Umwelt des Ozeans.

Die Forschenden warnen davor, dass sich die Auswirkungen von Salinitätsveränderungen mit Meereserwärmung, Sauerstoffmangel, Nährstoffanreicherung und erhöhten Sedimentbelastungen durch den Klimawandel und menschliche Aktivitäten weiter verstärken können. Thermische Ausdehnung, Süßwassereintrag und Salinitätsveränderungen tragen auch zur Anhebung des Meeresspiegels bei, was zu Salzwassereintrag in Küsten- und tiefliegenden Gebieten führt und dort die Struktur und Funktion von Ökosystemen stört.

Die Wissenschaftler betonen die Dringlichkeit, die mit Salinitätsveränderungen zusammenhängenden Belastungen aufzuarbeiten, um marine und Küstenökosysteme sowie deren Biodiversität zu schützen. Sie heben die Verletzlichkeit ausgewählter Lebensräume und ihrer Schlüsselorganismen hervor und skizzieren die Auswirkungen von Salinitätsveränderungen auf Mikroorganismen, Plankton, Korallen, Mangroven, Gezeitenmarsche, Makroalgen und Seegras.

Die Daten zeigen, dass die zu erwartenden Salinitätsveränderungen schon allein zum Zusammenbruch von Ökosystemen führen können. Salinitätsveränderungen treten jedoch nicht isoliert auf, so dass betroffene Lebensräume auch mit Veränderungen von Temperatur und Sauerstoffgehalt, Versauerung und Verschmutzung konfrontiert werden. Die entstehenden Wechselwirkungen stellen eine große Unbekannte in Bezug auf das Verständnis und den Erhalt unserer Ozeane und Küsten dar.

Die Review-Studie bietet wertvolle Einblicke in die von menschlichen Eingriffen verursachten Bedrohungen durch Salinitätsver-

änderungen für marine und Küstenökosysteme und skizziert die Konsequenzen für die menschliche Gesundheit und Wirtschaft in den oft dicht besiedelten Regionen.

Fachartikel:

Röthig, T., Trevathan-Tackett, S.M., Voolstra, C.R., Ross, C., Chaffron, S., Durack, P.J., Warmuth, L.M., Sweet, M. (2023): Human-induced salinity changes impact marine organisms and ecosystems, *Global Change Biology*, 12.07.2023. DOI: 10.1111/gcb.16859

Weitere Informationen:

Fraunhofer-Institut für Molekularbiologie und Angewandte Ökologie

https://www.ime.fraunhofer.de/de/Forschungsbereiche/Geschaftsfelder_AE.html

Professur für Genetische Adaptation in aquatischen Systemen, Universität Konstanz

<https://padlet.com/chrisvoolstra/voolstra-lab-genetics-of-adaptation-in-aquatic-systems-tddb7auy6n961um7>

(aus: Pressemitteilung Universität Konstanz vom 12. Juli 2023)

Mikroplastik: Einige Seen stärker belastet als die Ozeane

Mikroplastik findet sich weltweit in Seen und Stauseen. Die Verschmutzung betrifft selbst die entlegensten Orte, an denen der Einfluss des Menschen minimal ist. Zudem sind die Mikroplastikkonzentrationen im Süßwasser teilweise höher als in den subtropischen Ozeanwirbeln, also den Meeresgebieten, in denen sich große Mengen an Plastikmüll ansammeln. Das zeigt eine internationale Studie an 38 Seen und Talsperren unter Leitung der italienischen Universität Milano-Bicocca mit Beteiligung des Leibniz-Instituts für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB).

Die internationalen Forschenden untersuchten 38 Seen und Talsperren in unterschiedlichen Regionen der Welt mit unterschiedlichen Umweltbedingungen, um Faktoren für Mikroplastikverschmutzung zu identifizieren. Sie fanden in allen untersuchten Seen und Stauseen Mikroplastik – selbst in entlegenen Gegenden. Zu erwarten war, dass zwei Arten von Seen besonders anfällig für Mikroplastikverschmutzung sind: zum einen Seen und Stauseen in dicht besiedelten und urbanisierten Gebieten sowie große Seen und Stauseen mit großen Grundflächen, langen Verweilzeiten des Wassers und starkem menschlichem Einfluss.

Überrascht waren die Forschenden jedoch vom Ausmaß der Verschmutzung in einigen Seen: Obwohl die Mikroplastikkonzentrationen von See zu See stark variierten, erreichten oder übertrafen sie in den am stärksten verschmutzten Seen die Konzentrationen in den subtropischen Ozeanwirbeln – jenen bekannten Meeresgebieten, in denen sich große Mengen an Müll ansammeln.

Die gewonnenen Ergebnisse zeigen zum ersten Mal ein umfassendes Bild der Plastikverschmutzung in Seen. Sie verdeutlichen, wie wichtig es ist, Seen und Stauseen in den Kampf gegen die Mikroplastikverschmutzung einzubeziehen, sowohl für das Management als auch für den Erhalt der Ökosystemleistungen der Seen. Um verschiedene Seentypen abzudecken, untersuchten die Wissenschaftler Seen entlang eines Gradienten von Größe,

Tiefe, Besiedlungsdichte und Versiegelungsgrad des Umlandes. Da es sich um eine Momentaufnahme handelte, wurden zeitliche und räumliche Schwankungen des Mikroplastikvorkommens nicht berücksichtigt.

Etwa 45 % der Seen enthalten mehr als einen Plastikpartikel pro Kubikmeter Wasser:

Pro Standort filterten die Forschenden durchschnittlich 140 Kubikmeter Seewasser. Dabei zählten sie nur Mikroplastikpartikel, die größer als 0,25 Millimeter waren. Sie analysierten auch die Art des Kunststoffs und fanden vor allem Polyester, Polypropylen und Polyethylen.

Die Kunststoffsignatur war von See zu See sehr unterschiedlich: Die Mikroplastikkonzentration variierte über vier Größenordnungen von 0,01 bis zu mehr als 10 Partikeln pro Kubikmeter. Aber selbst in entlegenen Gegenden, wie im Lake Tahoe in der Sierra Nevada oder in Bergseen, war Mikroplastik zu finden. In 45 % der untersuchten Seen traten mehr als ein Partikel pro Kubikmeter auf, die am stärksten verschmutzten über 10 Partikel pro Kubikmeter.

Seen mit langer Verweilzeit des Wassers als Senke für Mikroplastik:

Zu den Seen mit der höchsten Mikroplastikbelastung gehören auch einige, die als Trinkwasserquellen genutzt werden, wie der Lago Maggiore (IT), der Luganer See (CH-IT), der Lake Tahoe (USA) und der Lake Neagh (UK). Sie sind zudem für die jeweilige Freizeitwirtschaft von zentraler Bedeutung.

Diese großen Seen sind aufgrund der langen Verweildauer des Wassers Senken für Kunststoffe. Im Tahoe-See beispielsweise dauert es etwa 650 Jahre, bis sich der gesamte Wasserkörper durch Zu- und Abfluss einmal ausgetauscht hat. Solche Seen fungieren als ‚Fallen‘ für Plastik und können im Laufe der Zeit erhebliche Mengen an Mikroplastik ansammeln.

In Deutschland überraschte der Stechlinsee die Forschenden mit relativ hohen Mikroplastikkonzentrationen in Form von Mikrofasern, denn das Ufer des Sees ist weitgehend natürlich und von Buchenwald umgeben. Die Forschenden vermuten, es handelt sich dabei vor allem um Fasern von der Kleidung der Badenden. Die Mikroplastikverschmutzung hat nicht nur negative Auswirkungen auf die Trinkwassernutzung, sondern auch auf Wasserorganismen und das Funktionieren des Ökosystems. Plastik, das sich an der Oberfläche von Gewässern ansammelt, kann die Freisetzung von Methan und anderen Treibhausgasen fördern. Kunststoffe im Wasser können mit der Atmosphäre, der Biosphäre und der Lithosphäre interagieren, was sich möglicherweise auf die biogeochemischen Kreisläufe auswirkt, d. h. auf die Zirkulation chemischer Elemente zwischen den verschiedenen Kompartimenten der Erde, die durch chemische Umwandlungen und Reaktionen von der lebenden Materie in die anorganische Materie übergehen, und zwar über Mechanismen, die noch nicht verstanden sind und eine ganzheitliche Bewertung der Kunststoffverschmutzung in Süßgewässern erfordern.

Die Studie ist in ihrer geographischen Ausdehnung und der Vergleichbarkeit der Ergebnisse einzigartig. Frühere Studien bezogen sich hauptsächlich auf eine begrenzte Anzahl von Süßwassersystemen in begrenzten geografischen Regionen. Darüber hinaus waren direkte quantitative Vergleiche zwischen den Stu-

dien aufgrund fehlender standardisierter Probenahmeverfahren nicht möglich.

Die Studie wurde im Rahmen des GLEON-Netzwerks durchgeführt. GLEON steht für Global Lakes Observatory Network, in dem Seenforscherinnen und -forscher aus aller Welt regelmäßig und unter standardisierten Bedingungen Daten von Seen erheben. So erhalten sie ein Bild davon, wie sich Seen weltweit im Zuge des Klimawandels und durch andere menschliche Einflüsse verändern.

Fachartikel:

Nava, V., Chandra, S., Aherne, J. et al. (2023): Plastic debris in lakes and reservoirs. *Nature* 619, 317–322 (2023). DOI: 10.1038/s41586-023-06168-4

Weitere Informationen:

Global Lakes Observatory Network

<https://gleon.org/>

Forschungsgruppe „Aquatische mikrobielle Ökologie“, Leibniz-Instituts für Gewässerökologie und Binnenfischerei
<https://www.igb-berlin.de/grossart>

(aus: Pressemitteilung Leibniz-Instituts für Gewässerökologie und Binnenfischerei vom 12. Juli 2023)

Kompetenzzentrum Wasser Berlin unterstützt das WaterMan-Projekt zur Förderung der Wasserwiederverwendung im Ostseeraum

Das Projekt „WaterMan“ fördert die Wiederverwendung von Wasser in der Ostseeregion, indem es lokale Behörden und Wasser- und Abwasserunternehmen bei der Entwicklung von Strategien zur Nutzung von aufbereitetem und zurückgehaltenem Wasser unterstützt. Das Projekt wird im Rahmen des Interreg Baltic Sea Region-Programm von 2023 bis 2025 durchgeführt und hat das Ziel, die Wasserwiederverwendung als neues Element der Wasserwirtschaft zu etablieren und eine klimaresiliente Wasserver-sorgung zu schaffen.

Mit einem Budget von 4,38 Mill. € werden Aktivitäten wie die Wiederverwendung von aufbereitetem und zurückgehaltenem Wasser, die Förderung von Akzeptanz bei Interessensgruppen und Nutzern sowie die Entwicklung einer "Ostseeraum-Toolbox zur Wasserwiederverwendung" finanziert. Das Vorhaben WaterMan zielt darauf ab, Wasserwiederverwendung in der Region einzuführen, etwa indem eine gemeinschaftliche Lernumgebung für lokale Behörden und Wasser- und Abwasserunternehmen geschaffen wird. Das Projekt wird von 43 Organisationen aus sechs Ländern unterstützt und konzentriert sich auf den südlichen Ostseeraum.

Das Kompetenzzentrum Wasser Berlin (KWB) spielt eine wichtige Rolle bei der Erarbeitung von Lösungen zur Förderung von Wasserwiederverwendung. Das KWB arbeitet eng mit den Projektpartnern zusammen, um eine Anleitung zur Methodik und zu den verfügbaren Instrumenten zu entwickeln, die lokalen Akteuren bei der Erkennung von Wasserbedarf, der Durchführung von Risikobewertungen sowie der Auswahl umweltfreundlicher Technologien helfen sollen. Das Projekt wird schließlich einen umfassenden und konkreten Leitfaden für lokale Behörden und Wasser- sowie Abwasserunternehmen entwickeln, um die Wiederverwendung von Wasser in der Region zu fördern. Mit dem Fachwissen der Mitarbeitenden über Wasserwiederverwendung, dem Austausch von Erfahrungen und der Schulung praktischer Fähigkeiten in Bezug auf Risiko- und Lebenszyklusanalysen leis-

tet das KWB mithilfe des WaterMan-Projekts einen wichtigen Beitrag zur Entlastung der natürlichen Wasserressourcen und zum Aufbau einer klimaresistenten Wasserwirtschaft im Ostseeraum. Weitere Informationen:

Projekt WaterMan, Kompetenzzentrum WasserBerlin
<https://www.kompetenz-wasser.de/de/forschung/projekte/waterman>

Interreg Baltic Sea Region-Programm
<https://interreg-baltic.eu/>

(aus: Pressemitteilung Kompetenzzentrum WasserBerlin vom 30. Juni 2023)

Nachhaltige Moornutzung – wirtschaftlich und ökologisch

Die Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde (HNEE), das Landesamt für Umwelt Brandenburg (LfU), das Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung e. V. (ZALF) und das Deutsche GeoForschungszentrum (GFZ) erproben und erforschen in den kommenden neun Jahren im Verbundprojekt „WetNetBB – Bewirtschaftung und Biomasseverwertung von nassen Niedermooren: Netz von Modell- und Demonstrationsvorhaben in Moorregionen Brandenburgs“ unter Leitung des Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie (ATB) gemeinsam mit vielen Praxispartner nachhaltige und wirtschaftliche Strategien zur Wiedervernässung und Moornutzung. Gefördert wird das Projekt durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), das einen Förderbescheid in einer Gesamthöhe von 18,4 € erteilt hat.

Durch jahrzehntelange Trockenlegung ist die Fähigkeit, Wasser in der Landschaft zu halten, in ehemaligen Mooregebieten außerordentlich stark reduziert worden aus der eine Vielzahl von negativen Auswirkungen auf den Landschaftswasserhaushalt resultierten. Das im Torf gebundene CO₂ wurde und wird weiter freigesetzt, die Böden verlieren dadurch an Masse und die moortypische Pflanzen- und Tierwelt geht mit der Entwässerung verloren.

Eine Anhebung der Wasserstände reduziert diese Prozesse. Im Projekt „WetNetBB“ wird daher in vier Gebieten von insgesamt 2.430 ha der Wasserstand an das ursprüngliche Niveau angeglichen. Um gleichzeitig unter diesen veränderten Bedingungen eine nachhaltige und rentable landwirtschaftliche Nutzung zu ermöglichen, werden im Verbundprojekt neue Wertschöpfungsketten entwickelt, erprobt und erforscht. Für die erzeugten Produkte werden zudem Vermarktungs- und Verwertungsmöglichkeiten geschaffen.

Bei der Anhebung der Wasserstände in Niedermoorgebieten können u.U. erhebliche Zielkonflikte entstehen, die durch historisch entstandene Ansprüche an die Flächen bedingt sind. Eine gelingende Beteiligung und Kommunikation kann als wesentliche Voraussetzung für den Erfolg von Vernässungsvorhaben verstanden werden. Kern der Transferarbeit wird ein Innovationsforum für nasse Moorbewirtschaftung sein, indem durch langfristige Vernetzung ein Austausch auf Augenhöhe möglich wird. Zum anderen ist die HNEE an der wissenschaftlichen Begleitung des Gesamtprojekts beteiligt und leistet einen Teil des ökologischen Monitorings. Dabei werden die Veränderungen der Standorteigenschaften durch die Vernässung sowie die Wirkung auf die Biomasse beobachtet und analysiert. Zusätzlich wird untersucht, wie sich die Vernässung und die veränderte Nutzung auf die Artenausstattung von Flora und Fauna der Flächen auswirkt. Neben

dem Verständnis der Veränderungsprozesse ist ein Ziel, Empfehlungen für den Erhalt und die Förderung von Biodiversität bei Vernässungsvorhaben abzuleiten.

Das Projekt WetNetBB umfasst die Module Flächenmanagement, Biomasseverwertung, Transfer sowie Öffentlichkeitsarbeit und wissenschaftliche Begleitung. Geforscht wird in vier repräsentativen moorreichen Modellregionen (Rhinluch/Havelland, Mittlere Havel, Uckertal-Randowbruch und Spreewald). Erreicht werden soll ein Verbund von Modell- und Demonstrationsvorhaben für die Nutzung nasser Niedermoore mit repräsentativen Moorflächen, Biomasseverwertungspfaden und relevanten Akteuren in Brandenburg.

Weitere Informationen:

Fachbereich FB Landschaftsnutzung und Naturschutz, Hochschule für Nachhaltige Entwicklung Eberswalde
<https://www.hnee.de/de/Fachbereiche/Landschaftsnutzung-und-Naturschutz/Fachbereich-Landschaftsnutzung-und-Naturschutz-K240.htm>

(aus: Pressemitteilung Hochschule für Nachhaltige Entwicklung Eberswalde vom 27. Juli 2023)

Nutzung der künstlichen Grundwasseranreicherung

Um in Berlin und Brandenburg vor Dürreperioden gewappnet zu sein, plädieren Hydrogeologen der TU Berlin dafür, die künstliche Grundwasseranreicherung zu nutzen. Diese Technologie ermöglicht es, in Dürreperioden zusätzliches Wasser zur Verfügung zu stellen. Bei der künstlichen Grundwasseranreicherung wird Oberflächenwasser, was bei Starkregenereignissen im Frühjahr, Herbst und Winter von Dächern und Straßen abfließt und aufgrund der Wassermassen nicht versickert, zwischengespeichert und dann gezielt in den Boden künstlich versickert oder injiziert. Durch die Bodenpassage erfolgt zusätzlich eine Reinigung. Auf diesem Wege wird die Grundwasserressource künstlich erhöht. Länder wie Spanien, Griechenland, Israel, Jordanien infiltrieren auch gereinigtes Abwasser und nutzen dies nach einer Bodenpassage zur landwirtschaftlichen Bewässerung. Ohne die künstliche Grundwasseranreicherung wären diese Länder kaum mehr in der Lage ihre Landwirtschaft zu versorgen. Israel zum Beispiel recycelt 90 % seines Abwassers. In Deutschland sei diese Technologie bislang nicht umgesetzt, weil die Wasserbehörden eine Verunreinigung des Grundwassers befürchten. Forschungsarbeiten in Spanien und Israel zeigen jedoch, dass diese Methode nur ein geringes Gefährdungspotenzial aufweist. Relevant ist jedoch, geeignete landwirtschaftlichen Kulturen und Bodensubstrate mit einem gutem Abbaupotenzial für Schadstoffe auszuwählen. Zusätzlich ist ein kontinuierliches Monitoring der Wasserqualität unerlässlich.

Die Nutzung von recyceltem Grauwasser würde es zum Beispiel auch erlauben, Stadtgrün wie Parks, Friedhöfe und Straßenbäume in Dürreperioden zu bewässern, anstatt verdorren zu lassen, weil es an Wasser mangelt und das Trinkwasser dafür zu schade ist. Aufgrund des Klimawandels sind städtische Grünflächen extrem wichtig geworden, damit Städte wie Berlin in Hitze- und Dürreperioden lebenswert bleiben und nicht zu einer Gefahr für die Gesundheit werden. Es werden zukünftig Parks, Grünanlagen sowie vor allem Straßenbäume für das Stadtklima und die Erholung benötigt. Die Bewässerung des Stadtgrüns zu untersagen ist für mich nicht sinnvoll im Kontext einer Klimaanpassungsstrategie. Geboten wäre vielmehr überschüssiges Wasser aus den Frühjahr-, Herbst- und Wintermonaten oder gereinigtes Grauwasser zu nutzen, als es ungenutzt in die Kanalisation abfließen zu lassen. Je stärker der Klimawandel durchschlägt, desto stärker

werden – so die Prognosen – die Unterschiede hinsichtlich des Niederschlags zwischen Herbst/Winter und Sommer. Und umso dringlicher wird es, die Niederschläge im Frühjahr, Herbst und Winter zwischen zu speichern, um sie in den Sommermonaten dann zu nutzen.

Im Rahmen des Forschungsprojektes SpreeWasser:N sammelt die Forschungsgruppe der TU Berlin im Jahr 2023 Beobachtungen der Anwohnerinnen und Anwohner im Einzugsgebiet der Unteren Spree. Die Bürgerinnen und Bürger in diesem Gebiet sind aufgerufen, ihre Gewässerbeobachtungen im Bereich der Unteren Spree zu melden. Weiter Informationen zu diesem Citizen Science-Projekt: <https://www.spreewasser-n.de/buergermeldungen/>

Weitere Informationen:

Fachgebiet Hydrogeologie, TU Berlin

<https://www.tu.berlin/hydrogeologie>

(aus: Pressemitteilung TU Berlin vom 14. Juli 2023)

Fassadenbegrünung "Living Wall" verbindet Nachverdichtung mit Hochwasserschutz

Bedingt durch den Klimawandel steigen die Temperaturen und Unwetter nehmen zu. Vor allem in den Innenstädten werden die Sommer für die Menschen zur Belastung. Durch Nachverdichtung wird zwar bestehende Infrastruktur genutzt und Zersiedelung vermieden, aber es steigt der Anteil an versiegelten Flächen. Das wirkt sich negativ auf Umwelt und Klima aus. Fassadenbegrünungen bringen hier mehr Grün in die Städte. Werden textile Speicherstrukturen eingesetzt, können sie sogar aktiv zum Hochwasserschutz beizutragen. Die Deutschen Institute für Textil- und Faserforschung (DITF) haben hierzu nun eine entsprechende „Living Wall“ entwickelt.

Die Pflanzen auf den grünen Fassaden werden über ein automatisches Bewässerungssystem mit Wasser und Nährstoffen versorgt. Die „Living Walls“ arbeiten weitgehend autonom. Sensorische Garne erfassen den Wasser- und Nährstoffgehalt. Der Aufwand für Pflege und Wartung ist gering.

Über neuartige hydraulische Textilstrukturen wird die Wasserführung geregelt. Das Pflanzsubstrat aus Steinwolle, auf dem die Pflanzen wachsen, verfügt durch seine Struktur über ein großes Volumen auf engem Raum. Je nachdem, wie stark die Niederschläge sind, wird das Regenwasser in einer textilen Struktur gespeichert und später zur Bewässerung der Pflanzen genutzt. Bei Starkregen wird das überschüssige Wasser mit zeitlicher Verzögerung in die Kanalisation eingeleitet. Die an den DITF entwickelten „Living Walls“ helfen auf diese Weise, in nachverdichteten Ballungsräumen die Ressource Wasser effizienter zu nutzen bzw. zurückzuhalten.

Im Forschungsprojekt wurde auch die Kühlleistung einer Fassadenbegrünung wissenschaftlich untersucht. Moderne Textiltechnik im Trägermaterial fördert die „Transpiration“ der Pflanzen. Dadurch entsteht Verdunstungskälte und die Temperaturen in der Umgebung sinken.

Zur Arbeit des Denkendorfer Forschungsteams gehörte auch eine Kosten-Nutzen-Rechnung und eine Life-Cycle-Analyse. Auf der Basis der Untersuchungen im Labor und im Außenbereich wurde ein „Grünwert“ definiert, mit dem sich die Wirkung von Gebäudebegrünungen als Ganzes bewerten und vergleichen lassen.

Weitere Informationen:

Technologiezentrum Smart Living Textiles

<https://www.ditf.de/de/technologien/technologiezentren/smart-living-technologies.html>

Denkendorfer Zukunftswerkstatt

<https://www.ditf.de/de/service-dienstleistungen/zukunftswerkstatt.html>

(aus: Pressemitteilung Technologiezentrum Smart Living Textiles und Denkendorfer Zukunftswerkstatt vom 30. Juni 2023)

Niedersachsen

Neues Portal des NLWKN zu Grundwassermessstellen

Dürre und Trockenjahre in Folge der Klimakrise sorgen vielerorts in Niedersachsen für sinkende Grundwasserstände. Mit der Verknappung der bestehenden Wasserreserven steigt zugleich das Interesse der Öffentlichkeit am wertvollen Nass aus der Tiefe. Ein neues Informationsportal des Niedersächsischen Landesbetriebs für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) ermöglicht jetzt erstmals eine tagesaktuelle Einschätzung der Situation an ausgewählten Grundwassermessstellen.

Für den Masterplan Wasser, für Niedersachsen erarbeitet wurde, ist jede Information rund

um die Lebensgrundlage Wasser enorm wichtig. Mit weiter steigenden Temperaturen und sinkenden Grundwasserpegeln werde die „Wasser-Schere“ immer weiter auseinandergehen. Darum werden umfangreiche und belastbare Werte benötigt, um mit entsprechenden Maßnahmen gegensteuern zu können. Vor allem sollte das wertvolle Grundwasser besser geschützt und nicht verschwendet werden. Insbesondere mit Blick auf den fortschreitenden Klimawandel liefert der NLWKN mit diesem neuen zusätzlichen Informationsangebot einmal mehr umfangreiche Umweltdaten und wertvolle Entscheidungsgrundlagen für die Öffentlichkeit, die Wasserwirtschaftsverwaltungen und die Politik in Niedersachsen.

Für das neue Web-Portal zu den Grundwassermessstellen wurden insgesamt 161 repräsentative Messstellen in den verschiedenen Regionen Niedersachsens mit einer aufwändigen Datenfernübertragungstechnik versehen. Die hier gewonnenen tagesaktuellen Wasserstandsdaten sollen die natürliche, witterungs- und klimatisch bedingte Grundwasserstandsentwicklung in Niedersachsen in Echtzeit sichtbar machen. Die täglich automatisiert erhobenen und übertragenen Messwerte ergänzen dabei die ganzjährig an tausenden Messstellen in Niedersachsen fortlaufend stattfindenden Messungen und Beprobungen des Grundwassers durch den NLWKN.

Mit dem neuen Angebot reagieren die Wasserfachleute des Landesbetriebs auch auf einen neu entstandenen Bedarf. Denn besonders die Trockenjahre seit dem Jahr 2018 und die Auswirkungen der langanhaltenden Trockenperioden mit hohen Temperaturen und ausbleibenden Niederschlägen haben das Interesse an zeitnah verfügbaren Informationen rund um die Entwicklung des Grundwasserstands deutlich erhöht.

Interessierte bisher kurzfristig vor allem, wo das nächste Hochwasser bevorsteht oder z.B. ein Fischsterben aufgrund von Sauerstoffmangel droht, kommt heute im gleichen Atemzug die Frage hinzu: Wie steht es genau in diesem Moment um unser Grundwasser? Die neu entwickelte Webanwendung „Grundwasserstandonline“ soll diese Informationslücke für Niedersachsen nun schließen. Sie ergänzt dabei die bereits vorhandenen NLWKN-Informationenportale „Pegelonline“ und „Gewässergüteonline“ zu aktuellen Entwicklungen im Oberflächenwasserbereich.

Umfangreiche Darstellungsmöglichkeiten „Grundwasserstandonline“ stellt tagesaktuelle Grundwasserstandsdaten dabei anhand einer Kartenansicht sowie in Form von Diagrammen und Tabellen anschaulich dar. Die webbasierte Darstellung ermöglicht darüber hinaus eine statistisch basierte Einordnung der aktuellen Daten in die langjährige Grundwasserstandsdynamik in klassifizierter Form. Auch eine Beurteilung von Grundwasserständen einzelner hydrologischer Jahre ist möglich. Auswirkungen etwa von Grundwasserentnahmen lassen sich vor dem Hintergrund der Fokussierung auf eine natürliche Grundwasserstandsentwicklung aus den Daten dagegen nicht ableiten. Die in der Webanwendung statistisch ermittelte Klassifikation der aktuellen Grundwasserstandsdaten dient vor allem einer besseren Einordnung in die langjährige Entwicklung der Grundwasserstände. Sie stellt keine Meldestufen dar, aus denen sich kritische Marken hinsichtlich des Grundwasserstands definieren lassen.

Weitere Informationen:

Web-Portal „Grundwassermessstellen, NLWKN
www.grundwasserstandonline.nlwkn.niedersachsen.de

Portal „Pegelonline“, NLWKN
www.pegelonline.nlwkn.niedersachsen.de

Portal „Gewässergüteonline“, NLWKN
www.gewaessergueetonline.nlwkn.niedersachsen.de

(Pressemitteilung Niedersächsischen Landesbetriebs für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz vom 6. Juli 2023)
 Sachsen

Management von Wasser, Boden und Natur im Mitteldeutschen und Lausitzer Braunkohlerevier - Auftaktveranstaltungen für das Projekt »RegioNet WasserBoden«

Die Strukturwandelregionen des Mitteldeutschen und Lausitzer Braunkohlereviere stehen vor großen wirtschaftlichen, sozialen und ökologischen Herausforderungen. Der regionale Naturhaushalt, insbesondere der Wasserhaushalt und das Bodengefüge sind durch den Kohleabbau massiv verändert. Die Folgen des Klimawandels verschärfen diese Situation mit den zunehmenden Extremen wie Dürreperioden, Hochwasser- und Starkregenereignisse. Dabei ist die Verfügbarkeit von Wasser in hinreichender Menge und Qualität einer der wesentlichen Standortfaktoren, der bei der wirtschaftlichen Neuorientierung der betroffenen Regionen von Anfang an beachtet werden muss. Gleichzeitig ist es eine der wichtigsten Grundlagen für die Daseinsvorsorge und für eine intakte Natur.

Das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) und die Landestalsperrenverwaltung des Frei-

staates Sachsen (LTV) werden die Braunkohlereviere Sachsens in den kommenden Jahren im Rahmen des Projekts »Regionale Netzwerke für ein nachhaltiges Wasser- und Bodenmanagement „RegioNet WasserBoden“ bei den Fragen zur nachhaltigen Umweltressourcennutzung als wichtigem Bestandteil des Strukturwandels fachlich unterstützen. Gestartet wurde das Projekt im Rahmen zweier Auftaktveranstaltung am 11. sowie am 13. Juli 2023 für das Lausitzer Braunkohlerevier in Rietschen. Bei beiden Veranstaltungen für die lokalen Akteure von Kommunen, Verbänden, Institutionen und Unternehmen ging es vor allem darum, das Projekt vorzustellen, erste Kontakte zu knüpfen und sich auszutauschen.

Hauptziel des Projektes ist die fachliche Unterstützung der regionalen Akteure bei der Umsetzung geplanter Vorhaben durch die passgenaue Bereitstellung von Fachinformationen. Wesentliche regionale Daten zum Wasserhaushalt, zum geologischen Untergrund, zum Boden und zu naturschutzfachlich relevanten Aspekten sollen ganzheitlich erfasst, aufbereitet und bewertet werden. Durch Weiterentwicklung von Bewertungsinstrumenten werden verbesserte Prognosen für den Wasserhaushalt, den Boden- und Naturschutz unter Beachtung des Klimawandels, der bergbaulichen Planungen und des zukünftigen Wasserbedarfs möglich. Auf dieser Grundlage können Strategien zur nachhaltigen Gewässerbewirtschaftung und Bodennutzung sowie der Entwicklung von Naturräumen abgeleitet werden. In regionalen Netzwerken, die während der Projektlaufzeit zu bilden sind, werden fachliche Erkenntnisse ausgetauscht.

Die Mittel für »RegioNet WasserBoden« kommen zu 90 % aus dem Förderprogramm STARK, mit dem der Bund den Transformationsprozess zu einer ökologisch, ökonomisch und sozial nachhaltigen Wirtschaftsstruktur in den Kohleregionen unterstützt. Die verbleibenden 10 % werden durch den Freistaat Sachsen getragen.

Weitere Informationen:

Portal „RegioNet WasserBoden“, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
<https://www.regionet.sachsen.de>

(aus: Pressemitteilung Landestalsperrenverwaltung des Landes Sachsen vom 13. Juli 2023)

IKSR

Beschluss des Rheinmessprogramms Biologie

Anlässlich der jährlichen Plenarsitzung der Internationalen Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR) am 30. Juni 2023 empfingen die Präsidentin Miriam Haritz aus Deutschland und der Co-Vorsitzende und Gastgeber Günter Liebel aus Österreich die neun Delegationen sowie anerkannte Beobachter, unter anderem NGOs, in Wien.

In der Sitzung wurde das Rheinmessprogramm Biologie 2024/2025 beschlossen. Alle sechs Jahre untersucht die IKSR im Rahmen einer internationalen Monitoring-Kampagne, wie sich fünf wichtige Bio-Indikatoren (Phytoplankton, Benthische Diatomeen, Makrophyten, Makrozoobenthos und Fischfauna) entlang

des Rheins entwickelt haben. Die Ergebnisse geben Aufschluss über den ökologischen Zustand des Rheins und werden in die Berichterstattung über die Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie im Rheineinzugsgebiet einfließen.

Anlässlich dieser neuen Messkampagne werden einige Delegationen einen Beitrag zu Forschungsprogrammen leisten, indem sie Wasserproben für spätere Analysen mit eDNA (Abkürzung von „environmental DNA“, Englisch für „Umwelt-DNA“) zur Verfügung stellen. Diese Methodik umfasst den Nachweis von DNA, also Erbgut, in der Umwelt, z. B. im Wasser eines Flusses. Dies erlaubt Rückschlüsse auf die dort vorkommenden Arten. Die Methodik bildet eine wichtige Ergänzung zu den herkömmlichen Beprobungen und ist gut geeignet, um beispielsweise die Verbreitung invasiver Arten im Rheineinzugsgebiet frühzeitig zu erkennen.

Außerdem hat die IKSR bekannt gegeben, dass sie – in Abstimmung mit den Staaten im Rheineinzugsgebiet und der Europäischen Union – im April 2023 eine Studie zur Evaluation der Bestandsentwicklung der Lachspopulationen im Gewässersystem Rhein in Auftrag gegeben hat. In den vergangenen Jahren hat die Anzahl der Lachsrückkehrer nicht in dem Maß zugenommen, wie aufgrund der umgesetzten Maßnahmen zu erwarten war. Die neue Studie soll daher in erster Linie Aufschluss über die möglichen Ursachen – u. a. häufigere Niedrigwasserphasen und verstärkten Prädationsdruck – geben und Maßnahmenvorschläge zur Optimierung der Wiederansiedelungsbemühungen formulieren.

Im südlichen Oberrhein gibt es Fortschritte bei der Wiederherstellung der ökologischen Durchgängigkeit. An den Staustufen in Rhinau und Marckolsheim hat der Bau von Fischpässen im Herbst 2022 bzw. Juni 2023 begonnen, wie die französische Delegation mitteilte.

Weitere Informationen:

Internationale Kommission zum Schutz des Rheins, IKSR

www.iksr.org

(aus: Pressemitteilung Internationale Kommission zum Schutz des Rheins vom 3. Ju