

Zusammenfassung SPATE Teilprojekt 7

Wie gut extreme Hochwasser für unbeobachtete Standorte in den kommenden Jahrzehnten prognostiziert werden können und wie groß dabei die Unsicherheiten sind, wird in Teilprojekt 7 „Vorhersagbarkeit von Extremereignissen“ untersucht. Unter Prognose von Hochwassern wird die Schätzung von Hochwasserquantilen gegebener Jährlichkeiten an unbeobachteten Standorten und / oder zukünftigen Zeitpunkten verstanden. Die Vorhersagbarkeit beschreibt im Anschluss die Quantifizierung und Attribution der Unsicherheit. Die Verbesserung der Prognose für unbeobachtete Standorte und zukünftige Zeitpunkte bezüglich Genauigkeit und Robustheit ist innerhalb des Teilprojekts von zentraler Bedeutung. Der Fokus liegt auf der Unterscheidung der Hochwassergenese, das heißt den hochwasserauslösenden Prozessen innerhalb der Prognose. Die Bestimmung und Reduzierung der Unsicherheit erfährt darüber hinaus eine besondere Beachtung.

Das Teilprojekt beinhaltet zwei Phasen. In der ersten Phase werden die Untersuchungen unter Annahme von zeitlich unveränderlichen Prozessen ausschließlich für die Hochwasserscheiteldurchflüsse und das Bundesland Niedersachsen mit dem Aller-Leine-Einzugsgebiet durchgeführt. Dieses Vorgehen beschreibt die univariate, stationäre Hochwasserstatistik. In der zweiten Phase werden sowohl zeitlich variable Prozesse als auch weitere Hochwasserkennwerte, wie das Volumen und die Dauer, betrachtet. Dieses Vorgehen beschreibt die multivariate, instationäre Hochwasserstatistik. Zudem sollen die Erkenntnisse der ersten Phase generalisiert und mittels des Untersuchungsgebiets des Neckars validiert und gegebenenfalls angepasst werden.

Die erste Phase ist in drei Arbeitspakete untergliedert. Das erste Arbeitspaket legt den Fokus auf die Daten-basierte Hochwasserprognose. Das zweite Arbeitspaket beinhaltet die stochastische Entwicklung von Klimaeingangsdaten, welche im dritten Arbeitspaket als Eingangsdaten für die Modell-basierte Hochwasserprognose benötigt werden.

WPO Datenaufbereitung

In einem ersten Schritt werden zunächst die vorhandenen hydrologischen und meteorologischen Eingangsdaten aufbereitet. Das vorrangige Untersuchungsgebiet innerhalb der ersten Phase bildet Niedersachsen mit dem Aller-Leine-Einzugsgebiet. Dabei werden von den meso-skaligen Einzugsgebieten (100 – 1000 km²) jene ausgewählt, welche kaum anthropogener Beeinflussung unterliegen. Um Effekte durch Skalenübergänge zu betrachten, werden zudem größere Einzugsgebiete des Aller-Leine-Gebiets verwendet.

Das Bundesland Niedersachsen weist eine Fläche von etwa 48000 km² auf. Dabei variiert die Geländehöhe in einem Bereich zwischen dem Meeresspiegelniveau und 1140 m üNN. Der mittlere jährliche Niederschlag liegt in einem Bereich von etwa 500 – 1700 mm/a. Das Jahresmittel der Temperatur beträgt etwa 6 – 10°C. Es liegen verhältnismäßig dichte Stationsnetze von Abfluss- und Klimastationen.

WP1 Daten-basierte Vorhersagbarkeit von Hochwassern

In einem zweiten Schritt erfolgt die Daten-basierte Prognose von Hochwasserscheiteldurchflüssen. Die Quantifizierung der Unsicherheit erfolgt hierbei ausschließlich auf Basis der hydrologischen Eingangsdaten. Um den verschiedenen hochwasserauslösenden Prozessen gerecht zu werden, erfolgt

eine Unterteilung des Datenkollektivs entsprechend der Hochwassertypen (siehe Cunderlik & Burn, 2002; Ouarda et al., 2006; Salinas et al., 2013 oder Fischer et al., 2016).

Diese erfolgt zunächst für die univariate, lokale Hochwasserstatistik. Für die beobachteten Hochwasserscheitel wird dabei Stationarität angenommen. Die langjährigen Abflussdaten werden mit ihren jeweiligen Antriebsfaktoren wie Niederschlag, Temperatur oder Einzugsgebietseigenschaften verknüpft und entsprechend ihrer Genese unterschieden. Dabei werden die geschätzten Hochwasserquantile bestimmter Jährlichkeiten auf Basis der gesamten Stichprobe mit jenen Schätzungen auf Basis der mittels der Hochwassergenese klassifizierten Teilproben verglichen. Für einen besseren Vergleich werden dabei klassische Verteilungsfunktionen jeweils für alle Pegel innerhalb des Untersuchungsgebiets angepasst. Die Unsicherheiten der Hochwasserschätzung werden mittels dem Bootstrapping-Verfahren quantifiziert (Schendel & Thongwichian, 2015).

Im Anschluss daran wird die Methodik auf die univariate, regionale Hochwasserstatistik übertragen. Der klassische index-flood Ansatz mittels L-Momenten nach Hosking & Wallis (1997) bildet dabei die Grundlage. Dafür müssen zunächst homogene Regionen innerhalb des Untersuchungsgebiets gefunden werden. Diese werden entsprechend der Einzugsgebietscharakteristiken gebildet. Kenntnisse über die dominanten hochwasserauslösenden Prozesse werden gegebenenfalls zudem bei der Regionsausweisung einen Mehrwert bilden. Die Quantifizierung der Unsicherheit erfolgt analog zur lokalen Hochwasserstatistik. Zusätzlich erfolgt die Bestimmung von Gütemaßen mittels einer Kreuzvalidierung.

In einem letzten Teilschritt werden die geschätzten Unsicherheiten der Hochwasserquantile mit den Antriebsfaktoren verknüpft und verglichen. Dadurch sollen dominante Antriebsfaktoren bestimmt und das Prozessverständnis erweitert werden. Ein besonderes Problem liegt dabei in der unbekanntem Referenz, da es sich stets um Schätzungen handelt. Insbesondere kurze Zeitreihen weisen hohe Unsicherheiten aufgrund der kleinen Stichprobe auf. Jene sollten daher nicht als Referenz dienen. Vielmehr ist eine Verwendung von Simulationsmethoden für eine objektive Beurteilung nötig.

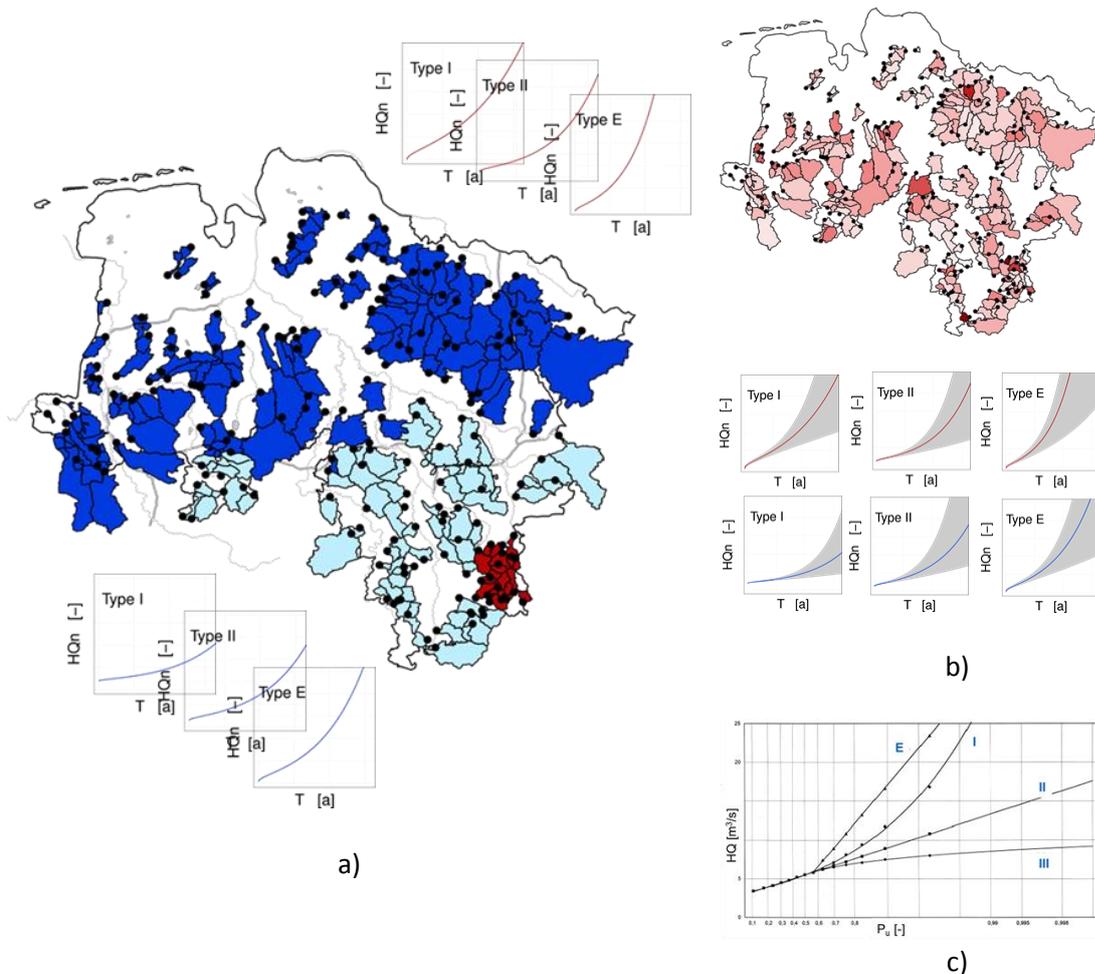


Abbildung 1 Daten-basierte Vorhersagbarkeit von Hochwassern: a) Regionale Hochwasserstatistik unter Beachtung der Hochwassertypen; b) Unsicherheitsbetrachtung aus Basis einer Monte-Carlo-Simulation aufgrund des Stichprobenumfangs der Beobachtung sowie aufgrund der Regionalisierung; c) Zusammenfassen der einzelnen regionsweisen, stratifizierten Verteilungsfunktionen

WP2 Stochastische Generation von Klimaeingangsdaten zur Hochwasserprognose

Innerhalb dieses Arbeitspaketes soll ein stochastischer Wettergenerator entwickelt werden, welcher es ermöglichen soll sowohl räumlich als auch zeitlich konsistente Klimaeingangsdaten (z.B. Niederschlag, Strahlung oder Temperatur) zu generieren. Die räumliche Skale soll dabei von der unteren Mesoskala (10^2 km^2) bis hin zur Makroskala (10^4 km^2) variabel gestaltet werden. Die zeitliche Skale wird auf eine stündliche Basis festgelegt um Hochwasserabflussprozesse in kleineren räumlichen Skalen adäquat simulieren zu können.

Darüber hinaus wird der Wettergenerator mithilfe von Klimavariablen konditioniert. Dies ermöglicht eine Anwendung über ein weites Spektrum von zukünftigen Klimaszenarien.

Der Grundgerüst des Wettergenerators wird realisiert durch ein stochastisches Niederschlagsmodell, welches bereits von der LUH entwickelt wurde (Callau & Haberlandt, 2017). Bisherige Anwendungen beinhalten die abgeleitete Hochwasserstatistik (Haberlandt et al., 2014), statistisches Downscaling des Niederschlags (Haberlandt et al., 2015) und hoch-aufgelöste Anwendungen in der Urbanhydrologie (Callau & Haberlandt, 2017).

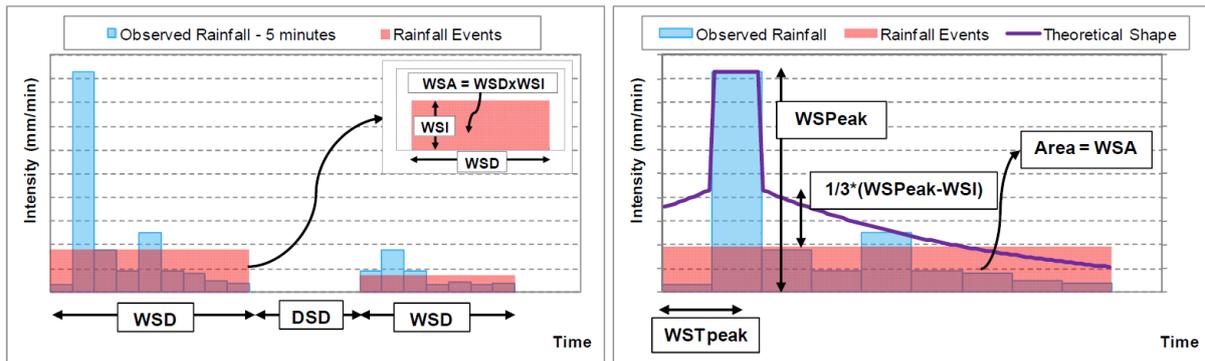


Abbildung 2 Modellstruktur des alternating renewal Niederschlagsmodells der LUH (Callau & Haberlandt, 2017)

Das Modell beschreibt einen Zwei-Schritte-Prozess. In einem ersten Schritt werden kontinuierliche Niederschlagszeitreihen für einzelne Stationen mittels eines alternating renewal process (Nass- und Trockenperioden) modelliert. In einem zweiten Schritt wird die räumliche Konsistenz mittels eines Simulated Annealing Ansatzes erzielt. Gegenseitige Abhängigkeiten zwischen Niederschlagscharakteristiken, wie beispielsweise zwischen Dauer und Menge oder Scheitelhöhe und durchschnittlicher Intensität, werden mittels eines bi-variaten Copula-Ansatzes realisiert. Durch eine Regionalisierung der Modellparameter mittels geo-statistischer Verfahren kann eine Modellierung ebenso für unbeobachtete Standorte erfolgen.

Simulated Annealing konnte bereits erfolgreich für kleinere räumliche Skalen angewandt werden (Haberlandt et al., 2008). Für eine effiziente Modellierung von räumlich größeren Ausdehnungen werden neue Techniken benötigt. Eine Unterscheidung in einen kontinuierlichen Anteil für gewöhnliche Randbedingungen und einen ereignisbasierten Anteil für Extremereignisse soll ebenfalls auf seine Eignung zur Verbesserung der Wiedergabe von Extremereignissen untersucht werden.

Andere Klimavariablen, wie beispielsweise Temperatur oder Strahlung, werden mittels der raumzeitlichen Ereigniszeitreihen entsprechend des feuchten oder trockenen Zustands des Niederschlagsmodells simuliert.

Darüber hinaus soll der wissenschaftliche Ansatz verfolgt werden, das Niederschlagsmodell an einer oder mehreren anderen Klimavariablen (Temperatur, Strahlung, etc.) zu konditionieren. Kreuz-Korrelationen zwischen den einzelnen Klimavariablen und dem Niederschlag können so erhalten werden.

Es sind alternative Ansätze zu dem genannten Modellierungsansatz verfügbar. Sowohl parametrische Ansätze (Fatichi et al., 2011) als auch nicht-parametrische Ansätze über die Gewinnung von künstlichen Stichproben aus Beobachtungs- oder Simulationsdaten (King et al., 2014) sollen hinsichtlich ihrer Effizienz und Güte beurteilt werden.

Weitere Klimavariablen wie Bedeckungsgrad, Luftfeuchte oder Windgeschwindigkeit werden gegebenenfalls ebenfalls mittels des Wettergenerators simuliert. Dies wird in Abstimmung mit den von den Projektpartnern gestellten Anforderungen geschehen. Eine Regionalisierung der Modellparameter soll die Simulation von Klimavariablen an unbeobachteten Standorten ermöglichen. Die Güte der Regionalisierung wird mittels Kreuz-Validierung beurteilt.

Die Validierung des Wettergenerators wird auf Basis von statistischen Kennwerten und der Korrelation zwischen den einzelnen simulierten Klimavariablen bewerkstelligt.

Eine Konditionierung des Wettergenerators anhand von großräumigen Zirkulationsmustern wie beispielsweise dem Luftdruck oder der Feuchte verspricht eine Verbesserung der Güte. Zudem kann dadurch eine Extrapolation in die Zukunft erfolgen. Eine häufig angewandte Strategie ist die Verknüpfung des Wettergenerators an Zirkulationsmustern (Burton et al., 2010). Veränderungen in der Häufigkeit der Zirkulationsmuster können jedoch die zeitliche Entwicklung des Niederschlagsverhaltens nicht vollständig beschreiben (Haberlandt et al., 2015). Durch Einbeziehung der zusätzlichen Klimavariablen wie Flüsse der Temperatur oder Feuchte in den Zirkulationsmustern wird eine bessere Beschreibung des Niederschlags erwartet. Die Zirkulationsmuster werden mittels eines fuzzy-rule Ansatzes klassifiziert (Bárdossy et al., 1995). Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf jenen Klimabedingungen, welche Extremereignisse bedingen. Um den ausgewählten Ansatz zu validieren, wird die Güte zwischen dem Modell mit und ohne einer Berücksichtigung von Zirkulationsmustern verglichen.

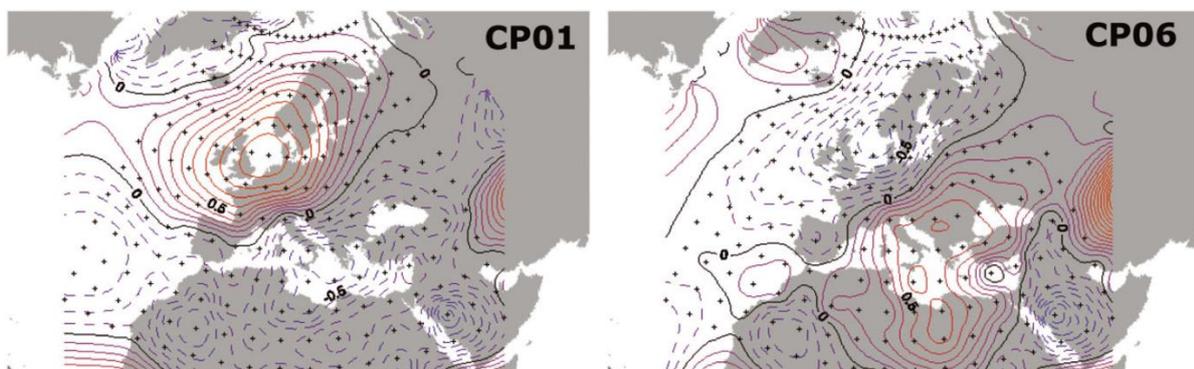


Abbildung 3 Beispiele für „feuchte“ (rechts) und „trockene“ (links) Zirkulationsmuster (hier: auf Meeresspiegelniveau standardisierter Luftdruck in Europa) basierend auf einer fuzzy-rule Klassifizierung (Haberlandt et al., 2015)

WP3 Modell-basierte Vorhersagbarkeit von Hochwassern

Innerhalb des dritten Arbeitspakets soll in einem ersten Teilschritt der Wettergenerator hinsichtlich seiner Eignung zur Entwicklung von Klimaeingangsdaten validiert werden. Das konzeptionelle, hydrologische Modell HBV-IWW wurde bereits mehrfach für die Anwendung in der abgeleiteten Hochwasserstatistik verwendet (Ding et al., 2015 oder Wallner & Haberlandt, 2015). Zunächst werden für einzelne ausgewählte meso-skalige Einzugsgebiete die Modelle mit den generierten Klimaeingangsdaten separat angetrieben und evaluiert. Im Anschluss erfolgt eine simultane Betrachtung dieser Gebiete, sodass Skaleneffekte innerhalb des Wettergenerators beurteilt werden können. Die Kalibrierung des hydrologischen Modells erfolgt hierbei auf Basis der Abflussstatistiken (Haberlandt & Radtke, 2014).

In einem zweiten Teilschritt wird die Referenzsimulation erstellt. Dafür werden mithilfe des Wettergenerators sehr lange Zeitreihen von Niederschlag und Klimavariablen für unterschiedliche Raum- und Zeitskalen in einer Größenordnung von 10000 Jahren generiert. Diese Zeitreihen werden als Klimaeingangsdaten für das hydrologische Modell für eine Vielzahl von Einzugsgebieten mit Flächen von etwa 100 bis 10000 km² verwendet. Ebenso werden unbeobachtete Gebiete betrachtet. Die simulierten Abflusszeitreihen dienen als Grundlage für die abgeleitete Hochwasserstatistik. Die daraus resultierenden, geschätzten Hochwasserquantile gegebener Jährlichkeiten bilden die Referenz für die im Anschluss folgenden Unsicherheitsbetrachtungen.

In einem letzten Teilschritt erfolgt eine Monte-Carlo-Simulation zur Betrachtung der Unsicherheit. Die Berücksichtigung der Modellunsicherheit resultierend aus dem hydrologischen Modell erfolgt auf Basis von unterschiedlichen Modellparametersätzen. Die Komplexität des Modellaufbaus bleibt unverändert. Die Berücksichtigung der Unsicherheit resultierend aus den Antriebsfaktoren wird durch eine Variation der Parametrisierung des Wettergenerators und somit durch eine Bandbreite möglicher Szenarioläufe realisiert. Die Unsicherheitsbetrachtung erfolgt zunächst jeweils getrennt und im Anschluss simultan, sodass eine Unterscheidung der Unsicherheitsquellen möglich ist. Die simulierten Abflüsse der Szenarien dienen erneut als Grundlage für die abgeleitete Hochwasserstatistik. Diese wird mit den Ergebnissen der Referenzdaten verglichen. Erkenntnisse hinsichtlich des Prozessverständnisses bei der Hochwassergenese werden vom Daten-basierten Ansatz auf den Modell-basierten Ansatz übertragen. Ein Vergleich der Daten-basierten und der Modell-basierten Prognose kann Erkenntnisse über die jeweiligen Fehlerquellen liefern.

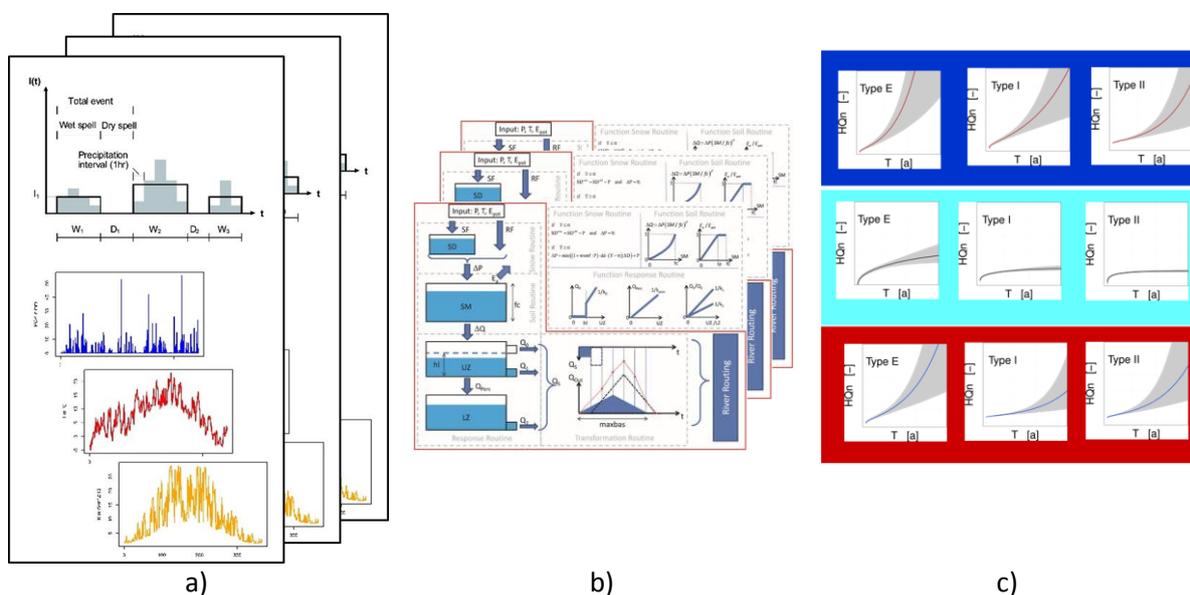


Abbildung 4 Modell-basierte Vorhersagbarkeit von Hochwassern: a) Referenz- und Monte-Carlo-Simulation unter Verwendung des Wettergenerators; b) Referenz- und Monte-Carlo-Simulation unter Verwendung des hydrologischen Modells; c) Vorhersagbarkeit der Hochwasser mittels der Szenariomodellierung unter Variation der Parametrisierung des Wettergenerators und der Modellparametrisierung des hydrologischen Modells

In der zweiten Phase werden instationäre Prozesse betrachtet. Weiterhin erfolgt eine Erweiterung um das Hochwasservolumen und die -dauer. Um ein generalisiertes Verständnis der hochwasserauslösenden Prozesse zu gewährleisten, erfolgt eine Validierung mittels des Untersuchungsgebiets des Neckars. Dabei sollen die Erkenntnisse der ersten Phase getestet und gegebenenfalls angepasst werden.

Zusammenfassend werden folgende Schwerpunkte bearbeitet:

- Bessere Hochwasserprognose mittels erweitertem Prozessverständnis durch Gebietscharakteristiken, Hochwassertypen, atmosphärische Bedingungen, etc.
- Skalenübergreifende hydrologische Modellierung zur Bestimmung der abgeleiteten Hochwasserstatistik
- Bedeutung von Extremereignissen im Vergleich zu gewöhnlichen Hochwassern

- Optimale Kombination von daten- und Modell-basierten Ansätzen zur Hochwasserprognose

Literaturverzeichnis:

- Bárdossy, Andras; Duckstein, Lucien; Bogardi, Istvan, 1995. Fuzzy rule-based classification of atmospheric circulation patterns. *International Journal of Climatology*, 15 (10), pp. 1087–1097.
- Burton, A., Fowler, H. J., Blenkinsop, S., & Kilsby, C. G., 2010. Downscaling transient climate change using a Neyman–Scott Rectangular Pulses stochastic rainfall model. *Journal of Hydrology*, 381(1), 18–32.
- Callau Poduje, A.C., Haberlandt, U., 2017. Short time step continuous rainfall modeling and simulation of extreme events. *Journal of Hydrology* 552, 182–197. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.06.036>
- Cunderlik, J.M., Burn, D.H., 2002. Analysis of the linkage between rain and flood regime and its application to regional flood frequency estimation. *Journal of Hydrology* 261, 115–131. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00019-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00019-7)
- Ding, J., Wallner, M., Müller, H., Haberlandt, U., 2015. Estimation of instantaneous peak flows from maximum mean daily flows using the HBV hydrological model. *Hydrol. Process.* <https://doi.org/10.1002/hyp.10725>
- Fatichi, S., Ivanov, V. Y., & Caporali, E., 2011. Simulation of future climate scenarios with a weather generator. *Advances in Water Resources*, 34(4), 448–467.
- Fischer, S., Schumann, A., Schulte, M., 2016. Characterisation of seasonal flood types according to timescales in mixed probability distributions. *Journal of Hydrology* 539, 38–56. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.05.005>
- Haberlandt, U., Belli, A., Bárdossy, A., 2015. Statistical downscaling of precipitation using a stochastic rainfall model conditioned on circulation patterns – an evaluation of assumptions. *International Journal of Climatology* 35(3): 417–432.
- Haberlandt, U., Radtke, I., 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. <https://doi.org/10.5194/hess-18-353-2014>
- Hosking, J.R.M., Wallis, J.R., 1997. *Regional Frequency Analysis: An Approach Based on L-Moments.* Cambridge University Press.
- King, L. M., McLeod, A. I., & Simonovic, S. P., 2014. Simulation of historical temperatures using a multi-site, multivariate block resampling algorithm with perturbation. *Hydrological Processes*, 28(3), 905–912.
- Ouarda, T.B.M.J., Cunderlik, J.M., St-Hilaire, A., Barbet, M., Bruneau, P., Bobée, B., 2006. Data-based comparison of seasonality-based regional flood frequency methods. *Journal of Hydrology*, Hydro-ecological functioning of the Pang and Lambourn catchments, UK Results from the Lowland Catchment Research (LOCAR) initiative 330, 329–339. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.03.023>
- Salinas, J.L., Laaha, G., Rogger, M., Parajka, J., Viglione, A., Sivapalan, M., Blöschl, G., 2013. Comparative assessment of predictions in ungauged basins – Part 2: Flood and low flow studies. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17, 2637–2652. <https://doi.org/10.5194/hess-17-2637-2013>

Schendel, T., Thongwichian, R., 2015. Flood frequency analysis: Confidence interval estimation by test inversion bootstrapping. *Advances in Water Resources* 83, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.05.004>

Wallner, M., Haberlandt, U., 2015. Klimabedingte Änderung von Hochwasserabflüssen im Aller-Leine-Einzugsgebiet - eine Fallstudie mit HBV-IWW. *Hydrologie und Wasserwirtschaft*.