

## **WETRAX+: Welche Wetterlagen führen zu Sturzfluten?**

Jucundus Jacobeit, Günter Blöschl, Jürgen Komma, Natalie Stahl, Michael Hofstätter, Klaus Haslinger, Georg Pistotnik

### **Zusammenfassung**

Im Rahmen des praxisorientierten Forschungsprojektes WETRAX+ werden klimabedingte Änderungen des Wasserhaushaltes und der Abflussregime in Süddeutschland und Österreich untersucht. Neben den klassischen großräumigen Starkniederschlagsereignissen im Zuge von Frontpassagen, stehen insbesondere kleinräumige Starkregenereignisse konvektiver Natur und persistente Trockenphasen im Mittelpunkt der Analyse. Als innovativer methodischer Ansatz wird ein Wettergenerator mit atmosphärischen Zirkulationsmustern in Kombination mit Zugbahntypen von Tiefdruckgebieten gekoppelt und auf Klimamodellsimulationen angewandt. Die Erweiterung durch hydrologischen Methoden ermöglicht es konkrete Aussagen über beobachtete und erwartete zukünftige Änderungen der Abflussregime im oberen Donauraum zu machen. Damit sollen Entscheidungsträger im grenzübergreifenden Hochwassermanagement in der Planung von Klimawandelanpassungsmaßnahmen bestmöglich unterstützt werden.

### **1. Einleitung**

Bayern ist in besonderer Weise von Hochwässern bedroht, wobei auch die kleinen Gewässer bzw. Einzugsgebiete durch lokale Starkregenereignisse zu dieser Gefährdung beitragen. Eine außergewöhnliche regionale Sturzflut ereignete sich im Mai/Juni 2016 im bayerischen Simbach und war die Folge einer ortsfesten Starkregenzelle verbunden mit einem gradientschwachen Tief über Mitteleuropa (BLfU 2017). Die Wetterlage Tief über Mitteleuropa steht jedoch auch in engem Zusammenhang mit Vb- oder Vb-ähnlichen Zugbahnen im Bodenluftdruck und damit verbundenen großräumigen, flächigen Starkniederschlägen. So konnte die Hälfte der 20 größten Hochwasser (1959-2015) im Donaeinzugsgebiet dieser Wetterlage zugeordnet werden. Bezieht man Vb-Zugbahnen in die Betrachtung mit ein, erhöht sich der Anteil sogar auf knapp 75 Prozent (Stahl & Hofstätter 2018).

### **2. Wasserwirtschaftliche Relevanz**

Da bestimmte Zirkulationsmuster und -abläufe systematisch und überproportional häufig mit Starkniederschlägen verbunden sind (Hofstätter et al. 2017), kann die Analyse dieser Wetterlagen und Zugbahnen genutzt werden, um atmosphärisch besonders risikoreiche Bedingungen für Starkregen frühzeitig zu erkennen und dadurch die Vorsorge vor extremen und hochwasserrelevanten Ereignissen zu unterstützen. Von besonderem Interesse ist dabei die Frage, wie sich diese Ereignisse zukünftig in Folge des Klimawandels verändern, sowohl hinsichtlich ihrer Häufigkeit als auch in ihrer Intensität und in zeitlich-räumlicher Abfolge. Die atmosphärischen Bedingungen sind für die Wasserwirtschaft jedoch nicht alleine von Bedeutung, sondern vor allem auch in ihrer hydrologischen Auswirkung, die z. B. durch die Vorfeuchte, die Infiltrationskapazität und die verschiedenen hydrologischen Speicher sowie das Gerinne bestimmt wird. Um diese Wirkungen zu beschreiben, bedarf es zusätzlich einer hydrologischen Modellierung. Die Umsetzung der bisherigen Erkenntnisse aus der Erforschung der starkniederschlagsrelevanten Wetterlagen und Zugbahnen von Tiefdruckgebieten, in Kombination mit einem stochastischen Niederschlagsgenerator und einer anschließenden hydrologischen Abflussmodellierung, wird im Rahmen der deutsch-österreichischen Kooperation WETRAX+ realisiert.

Viele heutige und zukünftige Fragen der Wasserwirtschaft lassen sich mit Modellierungen beantworten. Da Modellierungen immer mehr an Bedeutung gewinnen, werden Modelle und Daten aus verschiedenen Projekten mit Universitäten, aber auch aus der Wasserwirtschaft in Bayern in dem übergeordneten Container Wasser-Zukunft-Bayern zusammengefasst. Vom Wissens-Cluster Wasser-Zukunft-Bayern profitieren alle Projekte, da durch die gemeinsame Koordination wichtige Impulse gesetzt werden können und ein direkter Austausch einzelner Module erfolgen kann. Im Fokus steht dabei die konkrete wasserwirtschaftliche Anwendung der Forschungsergebnisse. Dabei ermöglicht die enge Zusammenarbeit mit dem Leibnitz-Rechenzentrum in Garching, auf der einen Seite sehr komplexe Berechnungen durchzuführen, auf der anderen Seite aber auch, die verschiedenen Projekte zu vernetzen, indem gemeinsame Schnittstellen und Datenhaltungen geschaffen werden. Bezüglich der Komponente Sturzfluten können Erkenntnisse aus WETRAX+ in die anderen Projekte, z. B. in das Sturzflutenprojekt HiOS (TUM, LMU und LRZ) einfließen, das sich im Gegensatz zu WETRAX+ vertieft mit der Simulation des wilden Abflusses an der Oberfläche beschäftigt. Andererseits können Erfahrungen aus KLIWA (BLfU) zur Auswahl der Klimamodelle eingebunden werden. Die Projekte HiOS und KLIWA werden in weiteren Beiträgen des Seminars vorgestellt.

### **3. WETRAX+**

#### **3.1 Vorstudie**

Im Vorläuferprojekt WETRAX (Weather Patterns, CycloneTracks and related precipitation Extremes) – „Auswirkungen des Klimawandels auf großflächige Starkniederschläge in Süddeutschland und Österreich: Analyse der Veränderungen von Zugbahnen und Großwetterlagen“ stand die Klimawandelanalyse von Wetterlagen und Zugbahnen im Vordergrund, welche vor allem für die Entstehung von Hochwasserereignissen in mittleren und großen Flussgebieten von Bedeutung sind (2012-2015). Dabei wurden großräumige Zirkulationstypen (Wetterlagen) und Zyklonen-Zugbahnen analysiert und deren differenzierte Starkniederschlagsrelevanz als paralleler methodischer Ansatz untersucht. Die Untersuchungen bezogen sich auf (süddeutsche und österreichische) Gebiete ähnlicher Niederschlagsvariabilität (Homann 2017) und damit auf die regionale Skala im Zusammenhang Zirkulation-Starkniederschlag unter Ausblendung von kleinräumig-konvektiven Extremereignissen. Die beiden verschiedenen Analyseansätze (Wetterlagen – Zugbahnen) wurden zunächst separat durchgeführt und erst nachfolgend eine Zusammenführung und ein Vergleich der jeweiligen Ergebnisse vollzogen (Hofstätter et al. 2015).

#### **3.2 Kombination von Zugbahnen und Zirkulationsmustern**

Im Folgeprojekt WETRAX+ (Beginn 2018) sollen nun beide Komponenten der atmosphärischen Zirkulationsdynamik schon in der Analysenmethodik zusammengeführt werden und überdies auch der kleinräumig-konvektive Starkniederschlag mit einbezogen werden, der das Potential für sog. Sturzfluten beinhaltet. Ersteres wird dadurch bewerkstelligt, dass in der Klassifikation von großskaligen Zirkulationstypen die erfassten Zyklonen-Zugbahnen als Kovariate integriert werden. Dies kann auf unterschiedliche Art geschehen: in einfacher Form nur mit der nominalen Information der etwaigen Präsenz einer klassifizierten Zugbahn oder in erweiterter

Form mit der metrischen Information der räumlichen Position des zugehörigen Tiefdruckkerns oder Vorticity-Maximums. In der resultierenden Klassifikation atmosphärischer Zustandsformen sind damit beide zirkulationsdynamischen Komponenten beinhaltet: sowohl die großräumige Strömungskonfiguration, die bestimmte Zugbahntypen begünstigen kann (Beispiel zonale Westwetterlagen mit Präferenz atlantischer Zugbahnen), als auch die konkrete Verlaufsform (Zugbahn) eines speziellen Zirkulationsbestandteils (Zyklone), das seinerseits den vorherrschenden Zirkulationstyp indizieren kann (Beispiel Vb-Zyklone, die häufig in eine großräumige Strömungskonfiguration mit Höhentrog und resultierendem Cut-off Low im Alpenraum eingebettet ist). Der beispielhaft in Abbildung 1 wiedergegebene frühjährliche Zirkulationstyp zeigt etwa eine Auftrittshäufigkeit der Vb-Zugbahn, die rund fünffach höher als im langjährigen Mittel liegt.

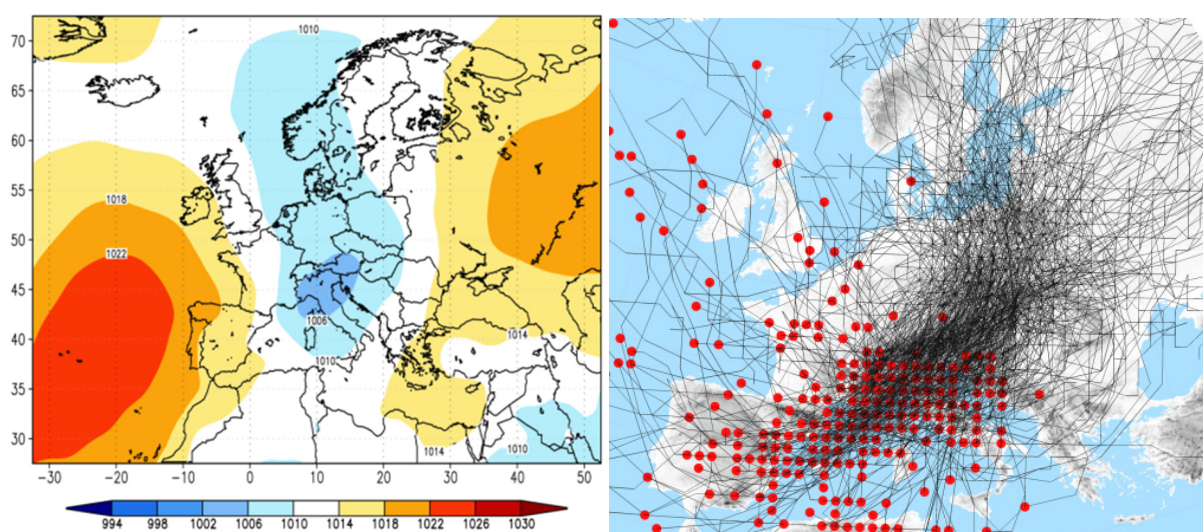


Abb. 1: Links: Luftdruck-Zentroid (hPa) eines starkniederschlagsrelevanten Zirkulationstyps (vgl. Jacobeit et al. 2017), der im Frühjahr 1951-2006 mit einer rund fünffach höheren Auftrittshäufigkeit der Vb-Zugbahn als im langjährigen Mittel verbunden gewesen ist. Rechts: Vb-Zugbahnen für den Zeitraum 1959-2015. Rote Punkte kennzeichnen den Startpunkt der jeweiligen Zugbahn. (Hofstätter et al., 2016 - modifiziert).

Die synchrone Klassifikation von Zugbahninformation und atmosphärischen Feldern (neben Luftdruck bzw. geopotentiellen Höhen auch Maße der Vertikalbewegung und thermodynamische Variablen wie Feuchtigkeitsgrößen) wird mit einer speziellen Variante der nicht-hierarchischen Clusteranalyse vorgenommen (Simulated Annealing and Diversified Randomization, siehe Philipp et al. 2007). Dabei sollen in Erweiterung früherer Analysen (z. B. Jacobeit et al. 2009) auch Persistenzen der Zirkulationstypen, Ereignis-Wiederholungen, wie sie gerade bei der Vb-Zugbahn häufig zu beobachten sind, zeitliche Instationaritäten im Zusammenhang Zirkulation-Starkniederschlag und typinterne Änderungen untersucht werden, die z. B. bei starkniederschlagsrelevanten Größen wie Feuchtigkeit und Hebung auftreten können und die Charakteristik von Zirkulationstypen zu ändern vermögen.

Um mit der skizzierten Methode der kombinierten Zirkulationstyp-Zugbahnen-Klassifikation auch Wetterlagen identifizieren zu können, die zu Sturzfluten führen, darf die Zielgröße ‚Starkniederschlag‘ nicht mehr wie im abgeschlossenen WETRAX-Projekt regional skaliert sein, sondern muss räumlich möglichst hochaufgelöst sein, d. h. mindestens auf Basis der individuellen Gitterboxen des WETRAX-Niederschlagsdatensatzes (Auflösung 6 km) oder jüngerer Stationsdaten mit auch zeitlich höherer Auflösung bis hin zu Stundendaten. Auch wenn sich damit kein ‚Wetterlagen-Katalog für Sturzfluten‘ generieren lässt, so lässt sich doch zumindest herausarbeiten, bei welchen großräumigen Strömungs- sowie vertikalen Feuchte- und Temperaturverhältnissen Sturzfluten bevorzugt zur Ausbildung gelangen und welche Ausprägung typinterne Parameter aufweisen müssen, um lokale Extremereignisse zur Folge zu haben. Die so identifizierten konvektions- und (konvektiv) starkniederschlagsrelevanten Kenngrößen werden auf etwaige Änderungen im Zuge des Klimawandels für die Vergangenheit und Zukunft untersucht. Weiterhin soll die entwickelte Zirkulationstyp-Identifizierung einschließlich typinterner Charakteristika für meteorologische Prognosefelder operationalisiert werden, um Einschätzungen des bevorstehenden Risikopotentials für Starkniederschläge vornehmen zu können. Schließlich soll (nach einschlägiger Modellvalidierung) die kombinierte Zirkulationstyp-Zugbahnen-Klassifikation auf ausgewählte regionale und globale Klimamodell-Läufe bis Ende des 21. Jahrhunderts angewendet werden, um mutmaßliche künftige Änderungen bei den starkniederschlagsrelevanten Zirkulationstypen abschätzen zu können. Wetterlagen mit Sturzflut-Potential sind jeweils Bestandteil dieser Arbeitsschritte und werden, soweit die inhärenten Unsicherheiten es erlauben, eigens einzugrenzen und zirkulationsdynamisch zu charakterisieren versucht.

### **3.3 Konditionierter stochastischer Wettergenerator**

Im Weiteren werden in WETRAX+ meteorologisch-klimatologische Auswertungen durch hydrologische Methoden und Analysen erweitert, um konkrete Aussagen über die Auswirkung auf den Wasserhaushalt bzw. das Abflussregime machen zu können. Der spezielle Fokus ist dabei auf das Hochwassergeschehen in unterschiedlichen Einzugsgebieten gerichtet. Dabei werden lange Niederschlags- und Lufttemperaturzeitreihen (10.000 Jahre) mittels stochastischer Niederschlagsmodellierung generiert. Das Ziel ist es, synthetische kontinuierliche Niederschlagszeitreihen zu erzeugen, sodass die jährlichen Niederschläge, die Saisonalität der Niederschläge, und insbesondere Extremniederschläge, die an Stationen im Einzugsgebiet gemessen wurden, wiedergegeben werden. Dafür wird ein modifiziertes Modell von Bardossy & Plate (1992) verwendet, in dem der Niederschlag auf Stationsbasis als multivariater autoregressiver Prozess (mAr) im Normalraum modelliert wird und anschließend in einen Gamma-verteilten Raum transformiert wird. Im Gegensatz zum Modell von Bardossy & Plate (1992), mit dem die Niederschläge auf Tagesbasis modelliert werden, wird hier eine zeitliche Auflösung auf Stundenbasis verwendet. Der Vorteil des geringeren Zeitschrittes ist, dass auch in kleinen Einzugsgebieten die Charakteristik von hochwasserbildenden Niederschlägen besser abgebildet werden kann.

Das Niederschlagsmodell wird durch 2 Parameter der Gamma-Verteilung beschrieben, die anhand der täglichen Niederschlagsmenge und der Beziehung zwischen 6 h und 24 h Niederschlagssummen für eine gegebene zeitliche Korrelation an jeder Station definiert werden. Die Parameter variieren bedingt an der kombinierten Zugbahnen/Wetterlagen- Klassifikation. Dafür ist es notwendig, dass die Klassifikation trennscharf für die Niederschlagscharakterisierung ist. Die Parameter des Wettergenerators werden an Stationsdaten kalibriert, in den Einzugsgebieten Obere Donau, Main, Mur, Drau und die großen österreichischen Zubringer zum Alpenrhein. Zusätzlich werden virtuelle Stationen mit regionalisierten Parametern verwendet zur Erhöhung der Stationsdichte, die für konvektive Ereignisse wichtig ist.

Für eine aussagekräftige hydrologische Simulation der lokalen Hochwasserereignisse ist neben der korrekten Abbildung der Niederschläge an den einzelnen Stationen auch die plausible Abbildung der räumlichen Muster des Niederschlags notwendig. Dazu wird eine Analyse der raum-zeitlichen Verteilungen von relevanten Niederschlagsereignissen im Modellgebiet durchgeführt und die Variogramme verglichen. Nach der Validierung des Niederschlagsmodells werden mit dem stochastischen Niederschlagsmodell 10.000 Jahre stündliche Daten generiert, die anschließend im hydrologischen Modell als Input verwendet werden. Die hydrologische Niederschlag-Abfluss-Modellierung erfolgt mit einem flächendetaillierten, kontinuierlichen Modell mit stündlichem Rechenzeitschritt. Die Modellstruktur umfasst Schneeakkumulation und Schneeschmelze, Bodenfeuchtehaushalt und Abflussbildungsprozesse sowie die Abflusskonzentrationsvorgänge. Nach der Parameteridentifikation anhand beobachteter Pegeldata wird das hydrologische Modell mit den stochastisch generierten Niederschlägen und Lufttemperaturen betrieben und 10.000 Jahre an Durchflüssen simuliert. Durch die räumlich-zeitliche Analyse der Niederschlag-Abfluss-Simulationen sollen auslösende Prozesse und exponierte Regionen besser identifiziert werden. In weiterer Folge wird die Modellkette aus Wettergenerator und Niederschlag-Abfluss-Modell für einen ausgewählten Lauf der Klimazukunft verwendet, um exemplarisch die künftige Entwicklung von lokalen Extremereignissen hinsichtlich ihrer Häufigkeit and Intensität abschätzen zu können.

Abschließend werden ausgewählte Starkniederschlagsereignisse aus dem erweiterten historischen Zeitraum 1850-1950, in Gestalt der bestimmenden atmosphärischen Zirkulationsmuster und durch Identifizierung der relevanten Abläufe und Prozesse, analysiert. Die damit verbreiterte Datengrundlage ermöglicht eine robustere Einordnung und Bewertung der für die Klimazukunft simulierten Änderungen von Hochwasser- und Trockenereignissen.

## Literatur

- Bardossy, A., Plate, E. J., 1992. Space-time model for daily rainfall using atmospheric circulation patterns, *Water Resour. Res.*, 28(5), 1247-1259, doi:10.1029/91WR02589.
- Bayrisches Landesamt für Umwelt (BLfU), 2017. Sturzfluten- und Hochwasserereignisse Mai/Juni 2016. Online: [www.bestellen.bayern.de/shoplink/lfu\\_was\\_00127.htm](http://www.bestellen.bayern.de/shoplink/lfu_was_00127.htm)
- Hofstätter, M., Lexer, A., Homann, M., Blöschl, G., 2018. Large-scale heavy precipitation over central Europe and the role of atmospheric cyclone track types. *Int. J. Climatol*, 38: e497-e517. doi:10.1002/joc.5386

- Hofstätter, M., Chimani, B., Lexer, A., Blöschl, G., 2016. A new classification scheme of European cyclone tracks with relevance to precipitation, *Water Resour. Res.*, 52, doi:10.1002/2016WR019146
- Hofstätter, M., Jacobeit, J., Homann, M., Lexer, A., Chimani, B., Philipp, A., Beck, C., Ganekind, M., 2015. WETRAX – Weather Patterns, Cyclone Tracks and related Precipitation Extremes. *Geographica Augustana* 19, 239 Seiten.
- Homann, M., 2017. Auswirkungen des Klimawandels auf atmosphärische Zirkulationstypen und starke Gebietsniederschläge im südlichen Mitteleuropa. Dissertation Universität Augsburg, 153 Seiten.
- Jacobeit, J., Rathmann, J., Philipp, A., Jones, P.D., 2009. Central European precipitation and temperature extremes in relation to large-scale atmospheric circulation types. *Meteorologische Zeitschrift* 18, 397-410.
- Jacobeit, J., Homann, M., Philipp, A., Beck, C., 2017. Atmospheric circulation types and extreme areal precipitation in southern central Europe. *Advances in Science and Research* 14, 71-75.
- Philipp, A., Della-Marta, P.M., Jacobeit, J., Fereday, D.R., Jones, P.D., Moberg, A., Wanner, H., 2007. Long-term variability of daily North Atlantic-European pressure patterns since 1850 classified by simulated annealing clustering. *Journal of Climate* 20, 4065-4095.
- Stahl, N., Hofstätter, M., 2018. Vb-Zugbahnen und deren Auftreten als Serie mit Bezug zu den resultierenden Hochwassern in Bayern und Auswirkungen auf Rückhalteräume im Isarinzugsgebiet – *Hydrologie & Wasserbewirtschaftung*, 62, (2), 77-97; DOI: 10.5675/HyWa\_2018,2\_2