

Information und Organisation in der hydrologischen Forschung und Praxis.

Beiträge zum Tag der Hydrologie am 28./29. März 2019 am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Erwin Zehe, Kirsten Hennrich, Uwe Ehret, Sibylle Hassler, Manuela Nied, Ulrike Scherer



Hydrologische Wissenschaften

Fachgemeinschaft in der DWA

HEFT **41.19**

Information und Organisation in der hydrologischen Forschung und Praxis.
Beiträge zum Tag der Hydrologie am 28./29. März 2019 am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Erwin Zehe, Kirsten Hennrich, Uwe Ehret, Sibylle Hassler, Manuela Nied, Ulrike Scherer

Veranstalter:

- ≈ Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Professur für Hydrologie
- ≈ Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften in der DWA (FgHW), Hennef
- ≈ Hauptausschuss Hydrologie und Wasserbewirtschaftung der DWA
- ≈ Deutsche Hydrologische Gesellschaft (DHG)

Mitveranstalter:

- ≈ Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW)
- ≈ KIT-Zentrum Klima und Umwelt (KIT-ZKU)
- ≈ Netzwerk Wasserforschung Baden-Württemberg



Erwin Zehe, Kirsten Hennrich, Uwe Ehret, Sibylle Hassler, Manuela Nied, Ulrike Scherer
(Herausgeber)

Information und Organisation in der hydrologischen Forschung und Praxis.

Beiträge zum Tag der Hydrologie am 28./29. März 2019 am Karlsruher Institut für
Technologie (KIT)

Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung; Heft 41.19

ISBN: 978-3-88721-821-8

DOI: 10.14617/for.hydrol.wasbew.41.19

Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften, 2019

Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung

Herausgeber:

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

Schriftleitung:

Dr. Christian Reinhardt-Imjela

Umschlaggestaltung:

Dorit Steinberger, Ohlstadt

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

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

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

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



Vorwort

Daten sind noch keine Information und Information ist noch kein Wissen! In diesem Zusammenhang adressierte der 21. Tag der Hydrologie grundlegende Fragen und Aufgaben in der hydrologischen Forschung und Praxis: Wie gewinnen wir hydrologisch relevante Daten, wie machen wir diese Daten für Forschung und Praxis zugänglich, und was können wir aus den Daten über die Organisation hydrologischer Systeme lernen? Sind die Struktur und Dynamik hydrologischer Systeme und Prozesse rein zufällig oder durch Organisationsprinzipien und Ähnlichkeitskonzepte erklär- und damit vorhersagbar? Wie kombinieren wir Wissen auf optimale Weise in Planungs-, Simulations- und Vorhersagewerkzeugen unter Berücksichtigung verbleibender Unsicherheiten? Und schließlich: Wie organisieren wir operationale Strukturen und Prozesse um Informationen schnell und zuverlässig an Betroffene weiter zu geben?

Der Tag der Hydrologie wurde vom Fachbereich Hydrologie am Karlsruher Institut für Technologie KIT in Zusammenarbeit mit der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg LUBW ausgerichtet. Die Tagung fand am 28. und 29. März 2019 am KIT in Karlsruhe mit nahezu 300 Teilnehmerinnen und Teilnehmern aus Universitäten, Forschungseinrichtungen, Verwaltung sowie Planungs- und Ingenieurpraxis und 21 Ausstellern statt.

Von den 156 als Vortrag oder Poster präsentierten Beiträgen gehörten je ein Drittel zu den Themenfeldern 'Datenbasiertes Lernen und Kombination von neuem Wissen' und 'Organisation und hydrologische Ähnlichkeit'. Weitere wichtige Themen waren 'Datenerhebung und Messverfahren' sowie 'Information und Risikokommunikation'.

Wir danken dem KIT für die Bereitstellung der Räumlichkeiten zur Ausrichtung der Tagung und die großartige Unterstützung durch das KIT Veranstaltungsmanagement. Unser Dank geht ebenso an die Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften und den Hauptausschuss „Hydrologie und Wasserbewirtschaftung“ der DWA sowie an die Deutsche Hydrologische Gesellschaft für ihre Unterstützung und das entgegengebrachte Vertrauen. Nicht zuletzt möchten wir allen Teilnehmerinnen und Teilnehmern für ihre interessanten Beiträge und Diskussionen sowie allen Helferinnen und Helfern für ihren großen Einsatz bei der Organisation und Durchführung der Veranstaltung danken.

Erwin Zehe und Uwe Ehret

Heft 41 2019 Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung

Information und Organisation

Vortragsprogramm 6

Datenerhebung / Messverfahren

- Gelleszun, M., Kreye, P., Somasundaram, M., Meon, G.*
 Innovative Methodik zur Klassifizierung bodenhydraulischer Eigenschaften
 anhand vorhandener Bodenparameter 9
- Vollmer, S., Schulz, D.*
 Berechnung historischer Wasserspiegel- und Sohllagen des Rheins 17
- Schimetzek, V.*
 Messnetzkonzept Hydrologie NRW – Teil Niederschlag 25
- Braun, M., Kutschera, G., Tabatabaei, S., Pätsch, M., Costa-Patry, E., Holzendorf, S.,
 Eckardt, D., Langeheinecke, K.-J., Pfister, A., Treis, A., Falk, D.*
 mobile^{VIEW} – Sensorgestützte Niederschlagserfassung aus fahrenden
 Fahrzeugen für die Echtzeit-Verdichtung von Niederschlagsinformationen 33

Datenspeicherung / Datenbereitstellung

- Schwandt, D., Hübner, G.*
 Zusammenführung von Daten (Durchfluss, Wassertemperatur und
 Sauerstoffkonzentration) zu Überblicksdarstellungen für die Flussgebiete
 Rhein, Weser, Elbe, Oder und Donau 41
- Eybl J., Godina R., Müller, G.*
 Hydrographische Daten für alle – Messen und Publizieren in Österreich seit
 125 Jahren 45
- Strehz, A., Einfalt, T., Alderlieste, M.*
 HydroNET-SCOUT – Ein Webportal zum Zugriff auf qualitätsgeprüfte
 Niederschlagsdaten 51

Information und (Risiko-) Kommunikation

- Düskau, T., Börke, P.*
 Anwenderorientierte Bereitstellung hydrologischer Daten am Beispiel des
 Umwelt- und Datenportals iDA des Freistaats Sachsen 57

<i>Fischer, F., Gönnert, G., Hesser, F., Ackermann, D.</i> Präventives Hochwassermanagement für ein tidebeeinflusstes Einzugsgebiet	61
--	----

Organisation und hydrologische Ähnlichkeit

<i>Grundmann, J., Schache, J., Lehmann, K., Röhm, P.</i> Starkregen und Hochwasser im ländlichen Raum – Ein kooperativer Ansatz zur Organisation von Hochwasserabwehr und Bewältigung für die Stadt Glashütte	71
<i>Förster, K., Chen, S., Hanzer, F.</i> Zeitliche Organisation meteorologischer Eingangsdaten - Praxisbeispiele aus Glaziologie und urbaner Hydrologie in einem Open Source-Projekt	77
<i>Ahrends, B., Wagner, M., Scheler, B., Meesenburg, H.</i> Der Einfluss dynamischer Bestandesparameter auf die Simulationsgüte von Interzeptionsmodellen für Buchenbestände	83
<i>Fuchs, G., Hoerhan, T.</i> Grundwasserspiegel, -volums- und Versickerungsberechnungen im österreichischen hydrographischen Dienst	91

Datenbasiertes Lernen und Kombination von neuem Wissen

<i>Haag, I., Aigner, D., Raffener, G.</i> Ein robustes Gletschermodul für die Hochwasservorhersage in hochalpinen Gebieten: Entwicklung, Parametrisierung und Validierung auf der Basis unterschiedlicher verfügbarer Daten	99
<i>Haag, I., Aigner, D., Krumm, J., Regenauer, J., Steinbrich, A., Weiler, M., Sieber, A., Bremicker, M.</i> Simulation von Hochwassern in der Folge von Starkregen mit LARSIM – ein Beispiel für die zielführende Nutzung vorhandener Bodendaten	105
<i>Krumm, J., Haag, I.</i> Multikriterielle Analyse eines Wasserhaushaltsmodells unter Berücksichtigung der Unsicherheit der Datengrundlage	111
<i>Krumm, J., Haag, I., Wolf, N.</i> Adaption des Wasserhaushaltsmodells LARSIM zur Anwendung bei veränderter Datenlage und unter subtropischen Bedingungen am Beispiel des Passaúna (Brasilien)	117
<i>Almoradie, A. D. S., Madruga de Brito, M., Evers, M.</i> A conceptual framework: Citizen Science for flood early warning system and risk awareness - A case study in Ghana	123
<i>Recknagel, T., Wilhelmi, J., Willems, W., Belz, J., Nilson, E., Krahe, P.</i> Der Einfluss von Langzeit-Autokorrelationen auf die Unsicherheit in der Trendanalyse hydrologischer Zeitreihen	131

<i>Reinhardt-Imjela, C., Imjela, R., Bölscher, J., Schulte, A.</i>	
Langzeiteffekte großräumiger mittelalterlicher und neuzeitlicher Entwaldungen im Erzgebirge und Auswirkungen auf die Scheitelabflüsse von Hochwasserereignissen	137
<i>Olmo Gil, E., Trappe, M., Kuegel, B., Kaul, U.</i>	
Bewertung des Einflusses des hydrologischen Verhaltens verschiedener Karsttributäre aus dem tiefen und seichten Karst auf die Wasserqualität der Altmühl	143
<i>Scheibel, M., Lorza, P., Teneketzi, E.</i>	
Nutzung von Klimadaten aus Zirkulationsmodellen: Tools für die Entscheidungsunterstützung der Talsperrenbewirtschaftung im Wuppereinzugsgebiet	149
<i>Mewes, B., Schumann, A.</i>	
Das Potential der Kombination von Maschinellen Lernen und Agentenbasierter Methoden in der Wasserbewirtschaftung	155
Verzeichnis der Autoren	163

Vortragsprogramm

Impulsvorträge

G. Adrian:

Austausch von Beobachtungsdaten in der Meteorologie

T. Maurer:

Dateninfrastrukturen – notwendige (aber nicht hinreichende) Grundlage für Umweltmodellierung und -management auf der Höhe der Zeit

Session 1: Datenerhebung / Messverfahren

C. Hohmann, Sungmin O, G. Kirchengast, U. Foelsche, W. Rieger:

Welche Netzdichte von Niederschlagsstationen brauchen wir bei Extremereignissen für die hydrologische Modellierung?

M. Neuper:

Warum Radare keine verlässlichen Niederschlagsinformationen liefern und warum wir sie trotzdem lieben

M. Braun, G. Kutschera, S. Tabatabaei, A. Treis, D. Falk, A. Pfister, M. Pätsch, D. Eckardt:

Forschungsprojekt mobileVIEW - Sensorgestützte Niederschlagserfassung aus fahrenden Fahrzeugen für die Echtzeit-Verdichtung von Niederschlagsinformationen

M. Zacios, L. Zimmermann, K.-H. Feger:

Vom Punkt zum Baum – vom Baum zum Bestand: Berechnung der Bestandstranspiration von Pappel-Plantagen aus punktuell gemessenen Saftflussdichten für drei Standorte mit unterschiedlicher Wasserverfügbarkeit

Session 2: Datenspeicherung / Datenbereitstellung

S. Dietrich, U. Looser, P. Saile, C. Färber, D. Lisniak, I. Dornblut, S.-H. Kleber, H. Köthe:

Aktueller Stand der globalen hydrologischen Datenbewertung

P. Kraft, D. Windhorst, L. Breuer:

Vom Feld zur Cloud: eine kollaborative Internetplattform zum Verwalten hydrologischer Observatorien

A. Strehz, T. Einfalt:

HydroNET-SCOUT – Ein Webportal zum Zugriff auf qualitätsgeprüfte Radarniederschlagsdaten

P. Keilholz, A. Renz, D. Spinnreker-Czichon:

Entwicklung Hub basierender Services am Beispiel eines Starkregeninformationsdienstes

Session 3: Datenerhebung / Messverfahren

J. Lange, O. Olsson:

Was können wir von nicht-konservativen hydrologischen Tracern lernen?

M. Gelleszun, P. Kreye, M. Somasundaram, G. Meon:

Innovative Methodik zur Klassifizierung bodenhydraulischer Eigenschaften anhand vorhandener Bodenparameter

L. van Schaik, T. L. Hohenbrink, A.-K. Schneider, B. Schröder-Esselbach, A. Zangerlé:

Spatial and temporal variability in infiltration: lessons learnt from a multitude of infiltration profiles and additional measurements

S. Wiek, B. Helm, P. Karrasch, S. Hunger, K. Kuhn, L. Bernard, P. Krebs:

Bootsgestütztes, längskontinuierliches Monitoring der Durchmischungscharakteristik an einem Zusammenfluss zweier Mittelgebirgsflüsse und die Datenhaltung von zeit- und ortsveränderlichen Messgrößen

S. Etter, B. Strobl, H. J. I. van Meerveld, J. Seibert:

Das Potential von unregelmässig erfassten und fehlerbehafteten Wasserstands-Klassen für die hydrologische Modellierung

Session 4: Information und (Risiko-) Kommunikation

G. Fink, M. Nied:

Sichere Informationen in unsicheren Abflussprojektionen – Beispiel Extremhochwasser in Baden-Württemberg

S. Naue, M. Bremicker, M. Vath:

Flut-Informations- und Warnsystem FLIWAS und App "Meine Pegel"

A. Jasper-Tönnies, T. Einfalt:

Mit Radardaten und Vorhersageensembles besser vor Starkregen warnen - Beispiel Hamburg

T. Hallas, M. Kilian, H. Puhmann, O. Conrad:

Entwicklung eines Online-Tools zur Borkenkäfer-Befallsprognose – Bodenwasserhaushaltsmodelle als Datenbasis für die Risikokommunikation in der Forstwirtschaft

A. Marx, S. Thober, M. Kelbling, L. Samaniego:

Saisonale Dürremagnitude – Trends und Einordnung der agrarischen Dürre 2018

Impulsvorträge

A. Hildebrandt:

Interaktionen zwischen Ökosystemstruktur und Wasserflüssen

A. Bárdossy:

Gütemaße für hydrologische Modelle

Session 5: Organisation und hydrologische Ähnlichkeit

A. Schäfer Rodrigues Silva, T. Seitz, A. Guthke, W. Nowak:
Quantifizierung der Modellähnlichkeit für Multi-Modell-Methoden

M. Stölzle, V. Blauhut, E. Tjardeman, K. Stahl:
Dürre 2018: Die Genese unterschiedlicher Niedrigwasser-Typen und deren Auswirkungen

Session 6: Datenbasiertes Lernen und Kombination von neuem Wissen

M. Casper, H. Mohajerani, T. Blume:
Verhaltensabbildende Parametrisierung eines 1-D-Wasserhaushaltsmodells

B. Merz, E. Steirou, L. Gerlitz, H. Apel, X. Sun:
Klima-informierte Analyse von Hochwasserhäufigkeiten

Session 7: Organisation und hydrologische Ähnlichkeit

J. Seibert, S. Pool, M. Vis, D. Viviroli:
Regionalisierung von Modellparametern – neue Möglichkeiten dank großer Datensätze

I. Pohle, M. Glendell, M. Stutter:
Identifizierung von ähnlichen Einzugsgebieten anhand von Konzentrations-Abfluss-Beziehungen

K. Schulz, M. Feigl, D. Klotz, M. Herrnegger:
Schätzen von Parameter-Transferfunktionen für hydrologische Modelle basierend auf dem Verfahren der „Symbolic Regression“

D. Caviedes-Voullieme, C. Hinz:
Banded vegetation dynamics and its dependence on local water redistribution affected by topography and rainfall frequency

Session 8: Datenbasiertes Lernen und Kombination von neuem Wissen

B. Mewes, A. Schumann:
Das Potential des Maschinellen Lernens und agenten-basierter Methoden in der Hydrologie und Wasserwirtschaft

G. Lischeid:
Big Data und Maschinelles Lernen statt Darcy und Richards?

E. Matta, Y. Ma, D. Meißner, J. Richter, H. Schellenberg, A. Schmid, R. Hinkelmann:
Kombination von neuronalen Netzen mit einem hydrologischen Modell für eine verbesserte Pegelvorhersage am Rhein

M. Evers:
Das Pluralistische Wasserforschungskonzept PWR zur Generierung von (neuem) integrativen Wissen

Innovative Methodik zur Klassifizierung bodenhydraulischer Eigenschaften anhand vorhandener Bodenparameter

Marlene Gelleszun, Phillip Kreye, Manickam Somasundaram, Günter Meon

Zusammenfassung

Eine effektive Parametrisierung basierend auf Texturklassifizierungen, wie z.B. dem USDA (U.S. Department of Agriculture) System, ist bezüglich des bodenhydraulischen Verhaltens der Böden oft nicht repräsentativ. Aus diesem Grund wurden neue Bodenklassen anhand der bodenhydraulischen Wirkungsweise erzeugt. Dafür wurden bis zu 1.000.000 Texturkombinationen erzeugt, für die basierend auf der Rosetta Datenbank van Genuchten Parameter ermittelt wurden. Mit Hilfe dieser Parameter wurden Durchbruchkurven auf Grundlage der Richards-Gleichung in verschiedenen Tiefen mit verschiedenen Regenereignissen berechnet. Im Ergebnis wurden diese Durchbruchkurven nach einem Ähnlichkeits-Algorithmus gruppiert. Es konnte gezeigt werden, dass die ermittelte Klassifizierung sich erheblich von den klassischen, auf Textur basierenden, Einteilung unterscheidet.

1. Einleitung

Viele Fragestellungen in der angewandten Hydrologie, die Aussagen zu Wasserhaushaltsentwicklungen, Niedrigwasser- oder Hochwasserhäufigkeiten beinhalten, setzen die Anwendung hydrologischer Modelle voraus. Im Allgemeinen wird davon ausgegangen, dass die Prognosefähigkeit dieser Modelle verbessert wird, wenn die darin enthaltenen Prozessbeschreibungen physikalisch orientiert sind, was wiederum mit einer umfangreichen Parametrisierung einhergeht. Erfahrungsgemäß sind nicht nur die offensichtlichen Daten aus Niederschlag und Abflussmessungen für eine erfolgreiche Modellkalibrierung und Validierung relevant, sondern insbesondere auch die räumlich differenzierten Daten zu Landnutzungen, Topografie und Bodeneigenschaften. Im Idealfall lassen sich entsprechende Parameter aus vorhandenen Messdaten direkt ableiten. Die flächige Parametrisierung von bodenhydraulischen Parametern ist jedoch nicht direkt möglich und birgt einige Herausforderungen, da die verfügbaren Bodeninformationen oft nur als übergeordnete Bodentypen vorliegen und meistens nicht als detaillierte Korngrößenverteilungen. Für die plausible Beschreibung der Bodenwasserbewegung als einer der dominanten Prozesse des Wasserhaushalts ist die Parametrisierung jedoch ein entscheidender Faktor. Aus diesem Grund wurde für die vorliegende Studie ein neuer Klassifizierungsansatz entwickelt, der auf bodenhydraulischen Eigenschaften, genauer Durchbruchkurven basiert. Die Datengrundlage bilden dabei zunächst 1.000.000 zufällige Texturkombinationen, für die anschließend mit Hilfe der Rosetta-Datenbank van Genuchten Parameter erzeugt wurden. Die Parameterschätzung innerhalb von Rosetta basiert auf einem Neuronalen Netz, welches wiederum anhand umfangreicher Daten aufgebaut wurde (siehe z.B. Schaap et al. (2001)). Als wesentliche Grundlage ist hier die UNSODA Datenbank zu nennen, die Messdaten über Bodenwasserspannungen, hydraulische Leitfähigkeit, Diffusivität und Texturinformationen von ca. 790 Bodenproben weltweit enthält (Leij et al. 1996).

In der vorliegenden Studie werden systematisch vorhandene Daten und Verfahren verwendet, um neue Erkenntnisse für die repräsentative Abbildung der Bodenwasserdynamik innerhalb eines flächendifferenzierten hydrologischen Modells zu erhalten.

2. Material und Methoden

Das methodische Vorgehen der vorliegenden Studie kann Abbildung 1 entnommen werden. Im ersten Schritt wurden 1.000.000 Texturkombinationen mit einem zufallsbasierten Algorithmus erzeugt. Für jede der erzeugten Sand-, Schluff- und Tonkombinationen wurden van Genuchten Parameter ermittelt. Dies erfolgte mit Hilfe der frei verfügbaren Software ROSETTA, die auf einem hierarchischen neuronalen Netz basiert (siehe z.B. Schaap et al. (2001); Leij et al. (1996) oder Nemes et al. (2001)). Die van Genuchten Parameter der jeweiligen Sand-, Schluff- und Ton-Triplets wurden anschließend für Bodenwassersimulationen auf Basis der Richardsgleichung (Richards, 1931) verwendet. Als obere Randbedingung wurde eine reale Zeitreihe des Effektivniederschlags verwendet. Die numerische Lösung der Richardsgleichung umfasste unter anderem Durchbruchkurven in ausgewählten Bodentiefen. Die berechneten Durchbruchkurven einer zuvor definierten Bodentiefe (hier 40 cm) dienten anschließend als Grundlage für den k-Means-Klassifizierungsalgorithmus (Lloyd, 1982; Arthur & Vassilvitskii, 2007). Weiterhin wurden auf Grundlage von Korrelationsanalysen die repräsentativen van Genuchten Parameter für jede Klasse ermittelt.

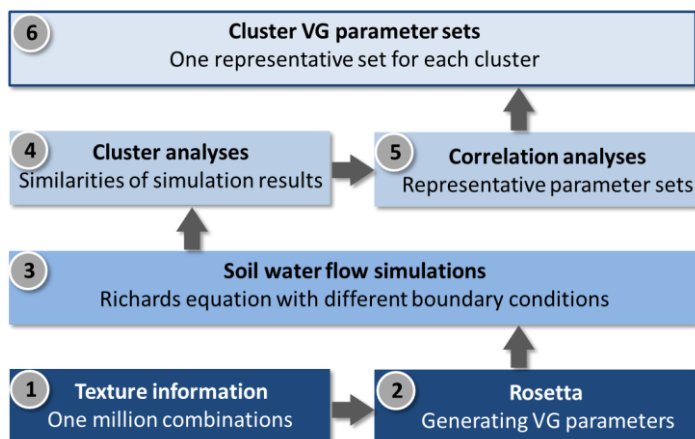


Abb. 1: Schematische Vorgehensweise zur Bodenklassifizierung anhand bodenhydraulischer Eigenschaften.

Die Anwendung des Klassifizierungs-Algorithmus setzte die Vorgabe einer Klassenanzahl voraus. Hierbei wurden verschiedene Ansätze verfolgt. Als Faustregel wurde auf die Regel nach Sturges (1926) zurückgegriffen, die als Eingangsvariable ausschließlich den Umfang der Stichprobe berücksichtigt (siehe Gleichung 1).

$$C = 1 + \log_2 N$$

Gl. 1

Mit:

C	Ideale Klassenanzahl	[-]
N	Stichprobengröße	[-]

Um den Einfluss der Klassenanzahl auf das Ergebnis genauer quantifizieren zu können und somit mögliche Fehlerquellen zu minimieren, wurde die Klassifizierung systematisch mit den

Klassengrößen 3, 4, 5, ..., 40 wiederholt. Verschiedene Gütekriterien wurden für die Bewertung der Klassifizierung herangezogen. Die Berechnung dieser Gütemaße erfolgte auf Basis jeder einzelnen Durchbruchskurve innerhalb einer Klasse vergleichend mit dem arithmetischen Mittelwert aller Repräsentanten dieser Klasse. Auf diese Weise wurde unter anderem der Nash-Sutcliffe-Koeffizient (1970), der Pearsonsche Korrelationskoeffizient und der RMSE berechnet. In Abbildung 2 sind diese Gütemaße gegen die jeweilige Klassenanzahl dargestellt. Die Klassenanzahl, ab der nur noch eine marginale Verbesserung der Gütekriterien (Ellenbogenkriterium) erreicht wurde, liegt etwa bei 15. Die Regel nach Sturges (Gleichung 1) liefert mit einer Anzahl von 17 Klassen die gleiche Größenordnung.

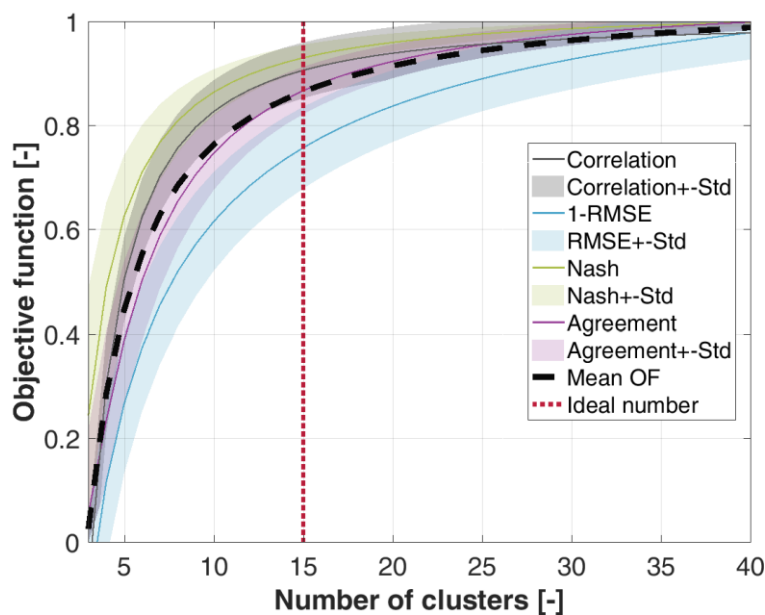


Abb. 2: Aggregierte, standardisierte Gütemaße der Clusteranalyse in Abhängigkeit der verwendeten Klassenanzahl. Alle Gütekriterien wurden auf den gleichen Wertebereich standardisiert (0 = keine Übereinstimmung, 1 = perfekte Übereinstimmung). Erklärung zur Legende: Correlation = Pearsonscher Korrelationskoeffizient, RMSE = Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme, Nash = Modelleffizienz nach Nash and Sutcliffe (1970), Agreement = Index of agreement, Mean OF = arithmetisches Mittel aller Gütekriterien. "Std" bedeutet Standardabweichung.

3. Ergebnisse

Als Ergebnis der Klassifizierung wurde jedes einzeln erzeugte Textur-Triplets eindeutig einer Klasse zugeordnet. Diese Klassen sind in Abbildung 3 dargestellt. Jede Farbe repräsentiert eine Klasse, die schwarzen Einteilungen sind die klassischen Bodenarten entsprechend des USDA-Systems. In Abbildung 4 sind für jede Klasse die Durchbruchkurven in 40 cm Tiefe dargestellt. Die 15 Zeitreihen unterscheiden sich deutlich hinsichtlich ihrer generellen Form, den Spitzen und Anstiegszeiten. Die repräsentativen van Genuchten Parameter der verschiedenen Cluster wurden aus einer Korrelationsanalyse ermittelt und sind in Tabelle 1 aufgelistet.

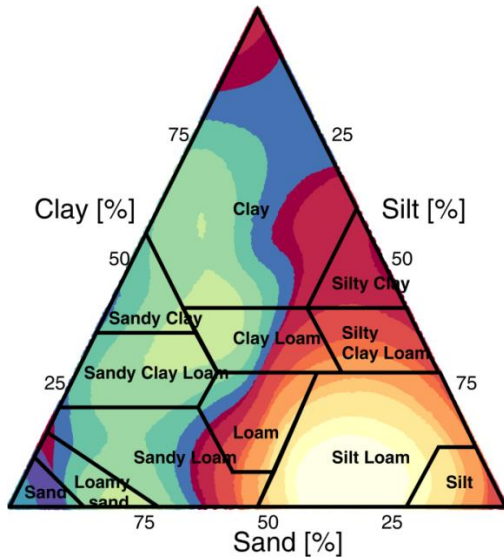


Abb. 3: Texturdreieck mit den eingezeichneten 15 Klassen (farbige Flächen) aus der Klassifizierung der Durchbruchskurven basierend auf einer zeitlich dynamischen oberen Randbedingung (Zeitreihe des Effektivniederschlags).

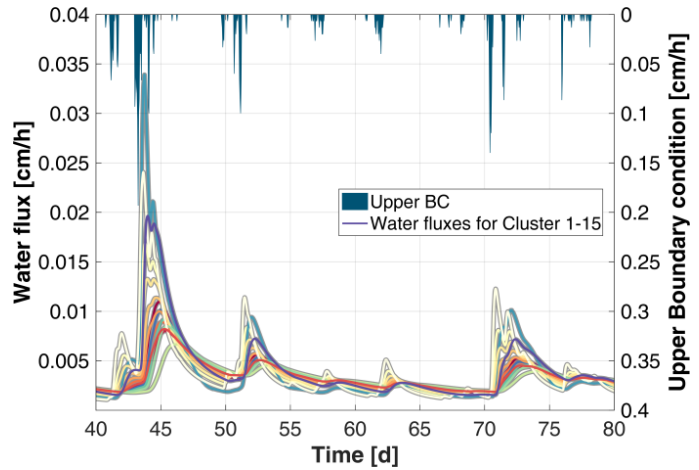


Abb. 4: Durchbruchskurven der 15 Klassen (farbige Linien) aus der Klassifizierung der Durchbruchskurven basierend auf einer zeitlich dynamischen oberen Randbedingung (Zeitreihe des Effektivniederschlags).

Tab. 1: Repräsentative van Genuchten Parameter für jede der 15 Klassen aus der Klassifizierung der Durchbruchskurven basierend auf einer zeitlich dynamischen oberen Randbedingung (Zeitreihe des Effektivniederschlags).

Nr	Θ_R [-]	Θ_s [-]	α [-]	n [-]	Ks [cm d ⁻¹]
1	0.049	0.448	0.005	1.721	44
2	0.051	0.479	0.006	1.694	43
3	0.065	0.463	0.006	1.660	22
4	0.069	0.468	0.006	1.636	18
5	0.075	0.469	0.007	1.612	13
6	0.087	0.471	0.008	1.539	11
7	0.093	0.479	0.010	1.453	13
8	0.101	0.499	0.015	1.300	21
9	0.103	0.505	0.020	1.158	17
10	0.108	0.511	0.018	1.153	18
11	0.074	0.399	0.024	1.300	9
12	0.073	0.384	0.027	1.263	13
13	0.071	0.372	0.025	1.276	14
14	0.053	0.376	0.032	2.582	356
15	0.056	0.373	0.031	3.347	744

Die Variation der Durchbruchkurven innerhalb eines Clusters wurde als Kriterium für die Repräsentativität der ausgewählten van Genuchten Parameter gewertet. Da die Ganglinien die Grundlage für den Klassifizierungsalgorithmus dienten, war zu erwarten, dass die Bandbreiten aller Ganglinien innerhalb eines Clusters nur sehr geringe Variationen aufweisen würden (vgl. Abbildung 5). In Analogie dazu werden die Bandbreiten der Durchbruchkurven aller Texturkombinationen exemplarisch für eine Bodenart entsprechend des klassischen USDA-Systems in Abbildung 6 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Parametrisierungen innerhalb einer Bodenart zu deutlich mehr Variationen der Durchbruchkurven führen, was in hydrologischen Modellanwendungen zu höheren Unsicherheiten führen kann.

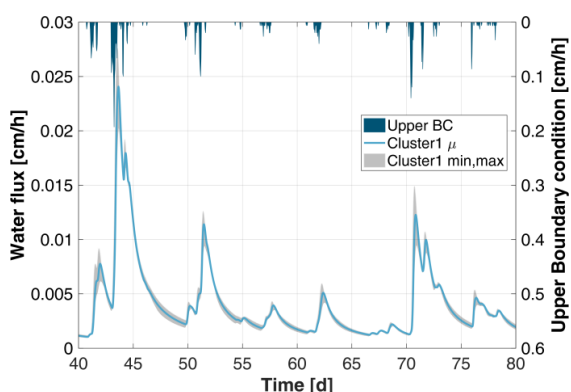


Abb. 5: Ganglinie des Wasserflusses in 40 cm Tiefe, erzeugt mit den repräsentativen Parametern für Cluster 1. Das graue Band zeigt die Bandbreite der Ganglinien aller Repräsentanten dieser Klasse.

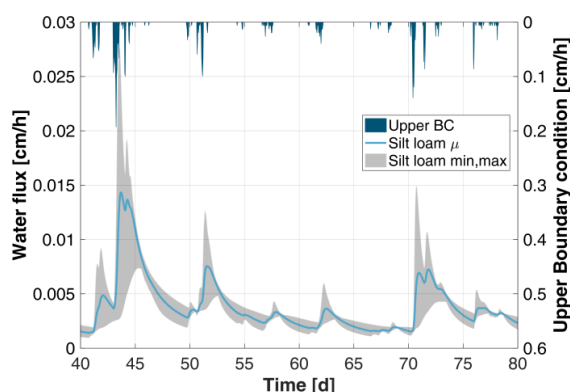


Abb. 6: In Analogie zu Abbildung 5 ist hier die repräsentative Ganglinie für „schluffigen Lehm“ nach dem USDA-System abgebildet. Das graue Band zeigt die Bandbreite der Ergebnisse bei Verwendung aller Texturkombinationen innerhalb dieser Bodenart.

Weiterhin wurden die Bandbreiten der ermittelten van Genuchten Parameter innerhalb der Klassen untersucht. Interessanterweise wiesen die Parameter innerhalb der neuen Cluster höhere Abweichungen voneinander auf als innerhalb der einzelnen USDA-Klassen. Somit kann zusammengefasst werden, dass die auf Textur basierenden USDA-Bodenarten ähnliche van Genuchten Parameter und Ks-Werte liefern, die jedoch zu höheren Unterschieden in den berechneten Durchbruchkurven führten.

4. Diskussion

Es wurde eine neue Bodenklassifizierung vorgestellt, die insbesondere für hydrologische Modellanwendungen Vorteile mit sich bringt. Im Allgemeinen werden bodenhydraulische Parameter für Anwendungen auf der Einzugsgebietsskala basierend auf Texturinformationen, wie beispielsweise dem USDA-System (Davis und Bennett, 1927), abgeleitet. Es wurde gezeigt, dass die simulierten Zeitreihen des Bodenwasserflusses innerhalb einer Bodenart des USDA-Texturdreiecks deutliche Unterschiede aufweisen (vgl. Abbildung 3). Sollen für hydrologische Modellanwendungen repräsentative bodenhydraulische Parameter geschätzt werden, liefert das USDA-Texturdreieck folglich keinen eindeutigen Parametersatz, der Gültigkeit für die gesamte Bodenart aufweist. Aus diesem Grund wurde eine Klassifizierung vor-

geschlagen, die das Körnungsspektrum in Klassen einteilt, die allein auf bodenhydraulischen Verhalten basiert. Dazu wurden mehr als 1.000.000 Simulationen des Bodenwasserflusses mit unterschiedlichen Parametrisierungen in hoher zeitlicher Auflösung durchgeführt. Diese Zeitreihen bildeten die Grundlage für den k-Means-Klassifizierungsalgorithmus. Die resultierenden 15 Klassen zeigen ein deutlich anderes Muster im Korngrößendreieck, als die klassischen USDA-Bodenarten (vgl. Abbildung 3). Die Durchbruchkurven innerhalb der neuen Klassen weisen wesentlich weniger Abweichungen untereinander auf, als innerhalb der USDA-Bodenarten (vgl. Abbildungen 5 und 6). Dies gilt sowohl für die Bandbreiten der Konfidenzintervalle, als auch für die berechneten Gütekriterien.

Werden hydrologische Modelle aufgebaut, erfolgt die Parametrisierung des Bodens üblicherweise anhand von vorhandenen Daten und Karten. Selten stehen flächendeckend die Korngrößenverteilungen zur Verfügung, sondern zumeist ausschließlich die Bodenarten entsprechend der klassischen USDA-Einteilung. Eine Parametrisierung der Böden kann für diese Fälle nur so genau sein, wie das Parameterspektrum der jeweiligen Bodenart. Als Lösung wird vorgeschlagen, nicht nur einen einzigen Effektivparametersatz für jede Bodenart festzulegen, sondern anteilig der Cluster innerhalb einer Bodenart mehrere Parametersätze gewichtet, in Analogie zu einer Parallelschaltung in der Elektrik, zu rechnen.

Die Ergebnisse dieser Studie basieren auf bodenhydraulischen Simulationen, gehen jedoch von einem vereinfachten Bodenmodell aus. Es wurde ein einheitlicher Boden ohne Oberflächengefälle und ohne Pfützenbildung implementiert. Obwohl der verwendete Ansatz sehr vielversprechend ist, sollten zukünftige Analysen Bodenstrukturen und Lagerungsdichten berücksichtigen.

Literatur

- Arthur, D., Vassilvitskii, S., 2007. K-means++: the advantages of careful seeding, in: Proceedings of the 18th Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms.
- Davis, R. O. E., Bennett, H. H., 1927. Grouping of soils on the basis of mechanical analysis, Department circular / United States Department of Agriculture, 419, U.S. Dept. of Agriculture, Washington, D.C., p. 15.
- Leij, F., William, J., van Genuchten, M., Williams, J., 1996. The UNSODA unsaturated soil hydraulic database: user's manual, EPA 600/R, National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio 45268.
- Lloyd, S., 1982. Least squares quantization in PCM, IEEE Trans. Inform. Theory, 28, 129–137, doi:10.1109/TIT.1982.1056489.
- Nash, J. E., Sutcliffe, J. V., 1970. River flow forecasting through conceptual models: Part I: a discussion of principles.
- Nemes, A., Schaap, M., Leij, F., Wösten, J., 2001. Description of the unsaturated soil hydraulic database UNSODA version 2.0, Journal of Hydrology 251, 151–162, doi:10.1016/S0022-1694(01)00465-6.
- Richards, L. A., 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums, Physics, 1, 318, doi:10.1063/1.1745010.

- Schaap, M. G., van Leij, J. F., van Genuchten, M. T., 2001. ROSETTA 2001: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions, *Journal of Hydrology* 2001, 163–176.
- Sturges, H. A., 1926. The Choice of a Class Interval, *Journal of the American Statistical Association*, 21, 65–66, doi:10.1080/01621459.1926.10502161.

Berechnung historischer Wasserspiegel- und Sohlagen des Rheins

Stefan Vollmer, Dirk Schulz

Zusammenfassung

Im Referat M3 (Gewässermorphologie) der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) wurden historische Datenquellen recherchiert und digitalisiert. Bei diesen Datenquellen handelt es sich um Wasserspiegelfixierungen, Pegelstände und Sohlpeilungen. Die ältesten Datenquellen zu Sohlhöhen und Wasserspiegelfixierungen stammen aus dem Jahr 1889, Informationen zu Pegelwasserständen wurden bis 1820 einbezogen. Auf Grundlage dieser historischen Daten, zusammen mit bereits vorhandenen digitalen Daten aus den jüngeren fünf Jahrzehnten, wurde untersucht, wie sich die Wasserstände im Niedrig- und Mittelwasserbereich sowie die Sohlhöhen und Fließtiefen in den vergangenen 200 Jahren entwickelt haben. Abgedeckt durch diese Analyse wird die deutsche freifließende Rheinstrecke zwischen Basel und Lobith. Eine solche Analyse auf Flussgebietskala erweitert das Verständnis der morphologischen Entwicklung des Rheins, der Veränderung der Wasserspiegellagen und der Wirkungen auf die schiffahrtsrelevante Fließtiefe sowie die Auenökologie. Die über einen Zeitraum von rund drei Jahren erfolgten Erweiterungen und Plausibilisierungen der historischen Datengrundlagen münden in den hier beschriebenen und in der BfG-Software FLYS abgelegten Datensatz [4].

1. Recherche, Digitalisierung und Plausibilisierung historischer Daten

Ein erster Schritt zur Erweiterung des Datenbestandes wurde bereits im Jahr 2017 getan. Damals erhielt das Referat M3 einen großen Bestand an historischen Wasserspiegelfixierungen (WSP) im Original bzw. in Kopie, die aus dem Zeitraum 1882 bis 1989 stammen für den Rhein-Abschnitt des heutigen Amtsbereichs Bingen. Diese historischen Fixierungen lagen in Form von analogen Längsschnitten und Tabellen vor. Für eine ausführliche Dokumentation der Vorgehensweise bei der Digitalisierung wird auf BfG (2017) [2] verwiesen. Die ältesten zur Verfügung stehenden Daten zu WSP-Fixierungen stammen aus der „Denkschrift über die Ausführbarkeit einer weiteren Vertiefung des Rheins von Coblenz bis zur niederländischen Grenze“ von R. Jasmund (1898) [7]. Hier wurden mehrere Fixierungen zu Ende des 19. Jahrhunderts durchgeführt; neben fünf Fixierungen enthält dieser Bericht einen Datensatz zur Sohlhöhe. Räumlich erstrecken sich die Daten von Rhein-km 592 bis 865.

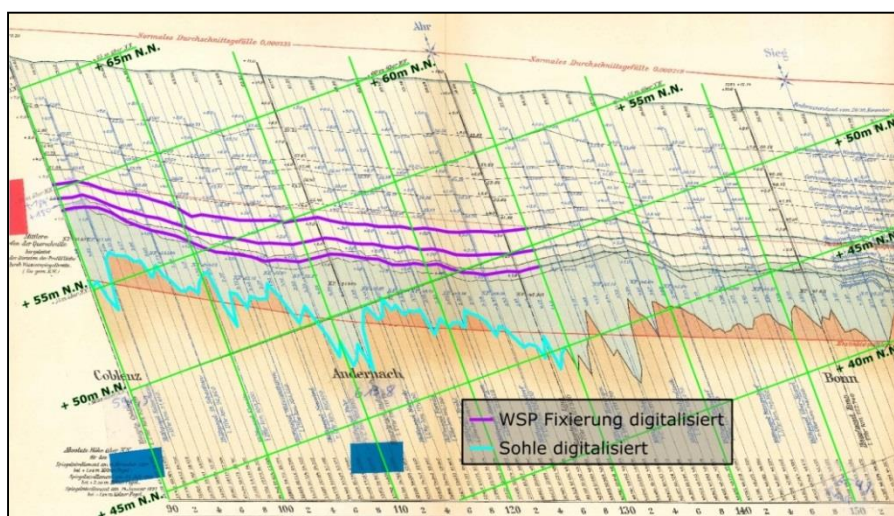


Abb. 1: Historische Wasserspiegelfixierungen und Sohlhöhen (R. Jasmund, 1898)

Im Bericht von Jasmund (1898, vgl. Abb. 1) sind die Achsen entgegen des Gefälles im Flussverlauf gekippt, so dass Unterschiede der Ordinaten deutlicher hervortreten. Mit dieser Technik ist es möglich längere Flussabschnitte in Längsprofilen mit Höhenbezug darzustellen, ohne dass die Kurven dann aufgrund des Maßstabes annähernd aufeinander fallen. Die Darstellung der Daten für die WSP-Lagen und mittlere Sohlhöhen (MSH) übernehmen wir nachfolgend häufig in dieser vorteilhaften Methode wie im Bericht von Jasmund (1898, vgl. Abb. 1) und nicht stets in der gewohnten Form eines rechtwinkligen Diagramms.

Eine weitere Datenquelle „Längsschnitt des Rheinstromes“ führt verschiedene WSP-Fixierungen aus dem Zeitraum zwischen 1896 und 1927 zusammen. Sie besteht im Original aus fünf A0-Blättern. Jedes Blatt enthält einen unterschiedlichen Abschnitt des Rheins. Räumlich erstrecken sich die Daten von Stromkilometer 0 bis 363 nach preußischer Kilometrierung. Dies entspricht einer heutigen Kilometrierung von Rhein-km 502 bis 865.

Im Februar 2018 erhielt das Referat M3 mehrere Unterlagen mit historischen WSP-Fixierungen und Sohlhöhen aus dem Archiv des WSA Duisburg-Rhein. Die älteste Quelle enthält MSH-Daten aus der Zeit 1881/1887, die neueste eine Fixierung aus dem Jahr 1982. Räumlich erstrecken sich die Quellen im Bereich von der ehemals preußisch-hessischen Grenze (Rhein-km 502) bis zur Deutsch-Niederländischen Grenze (Rhein-km 865).

Weitere hier verwendete Quellen sind u.a. das „Rheinstromwerk“ (1889), Eschweiler (1952), Hinrich (1982) [5, 6, 8].

Nach der Digitalisierung der zahlreichen analogen Quellen musste festgestellt werden, in welchem Höhenreferenzsystem die Daten aufgenommen wurden. Dazu wurden Abgleiche der ebenfalls in den alten Datenquellen aufgeführten Pegelnullpunkte vorgenommen. Danach wurden die Höhenwerte an ein Vergleichs-Höhenreferenzsystem (in diesem Fall DHHN92) angepasst. Dies geschah durch die Addition von sogenannten Shift-Werten, die vom Referat M5 „Geodäsie“ der BfG erarbeitet wurden. Für den Gültigkeitsbereich der Hauptpegel werden nachfolgend systematisch Durchflüsse aus der WISKI-Datenbank abgefragt. Falls an einem Hauptpegel kein Tagesabfluss abgefragt werden kann, werden Tagesabflüsse in Abhängigkeit der Größe des jeweiligen Einzugsgebiets interpoliert/extrapoliert.

Die daran anschließende Vorgehensweise mit der in der BfG-Software FLYS [4] enthaltenen Berechnungsart „Ausgelagerte Wasserspiegellage“ lässt sich verkürzt wie folgt darstellen: Liegen für zu untersuchende Zeiträume (Epochen) hinreichend viele Messungen aus Wasserspiegelfixierungen vor, werden im ersten Analyseschritt die Wertepaare (Wasserstand, Abfluss) in W-Q Diagrammen stationsbezogen durch Ausgleichskurven (im Sinne von Abflusskurven; log-lineare Funktionen) angepasst. Für jede Epoche werden im nächsten Berechnungsschritt die (so für jeden Hektometer ermittelten) Kurvengleichungen für die festgelegten streckenweise geltenden Bezugsabflüsse ausgewertet, um so die dort für diese Abflüsse sich einstellenden Wasserstände zu ermitteln als durchgehende WSP-Lagen [1, 3].

Somit wurden als Basis für weitere Auswertungen (insb. zum zeitlichen Verlauf der Wasserspiegellagen und Sohlhöhen und zu der sich aus deren Differenz ableitenden Fließtiefe) die Parameter Wasserspiegellage (sowohl für niedrige Abflüsse MNQ als auch für Mittelwasser MQ) und Querprofil-gemittelte Sohlhöhe (MSH) für korrespondierende Epochen gebildet.

Die Datenbasis der historischen WSP-Fixierungen und Sohlhöhen ist abgelegt in dem Datenportal FLYS [4] der Bundesanstalt für Gewässerkunde. Vergleichbare Datensätze liegen

hier auch für die anderen großen freifließenden Strecken der Binnenwasserstraßen Elbe und Oder vor. Die BfG verwendet ihre Software FLYS für weitergehende Analysen mit Bezug zu Morphologie, Schifffahrt und Auenökologie. Die Module M-Info, S-Info, Betrieb und Unterhaltung und U-Info sind in der INtegralen Gewässerkundlichen Datensicht (INGwerDs) so zusammengezogen, dass Disziplinen übergreifende Verknüpfungen zwischen morphologisch-sedimentologischen, hydrologischen und ökologischen Daten zu neuen Parametrisierungen möglich werden, wie z.B. der Fließtiefe und der zeitlichen Fließtiefenentwicklung. Die Funktionalität und Visualisierungsoptionen in FLYS dienen hierbei auch der Plausibilisierung.



Abb. 2: Plausibilisierung und Strukturierung der historischen Daten in FLYS-INGwerDs

2. Übersicht über den Datensatz

Wasserspiegellagen konnten für mehrere Zeiträume (Epochen) berechnet werden, für die historisch Peilungen vorlagen und damit eine mittlere Sohlhöhe (MSH), allerdings nicht immer mit kompletter Abdeckung. Die berechneten Wasserspiegellinien wurden dort, wo möglich, mit Wasserständen aus historischen Abflusstafeln verglichen; die Abweichungen bewegen sich größtenteils im Bereich von +/- 0,10m. Entlang von Mittel- und Niederrhein lassen sich auf diese Art 7 Epochen erarbeiten, für die die Sohllagen MSH mit niedrigen und mittleren Wasserspiegellagen W(MNQ) und W(MQ) systematisch verglichen werden können und aus der Differenz von MSH und W(MNQ/MQ) Fließtiefen berechnet wurden.

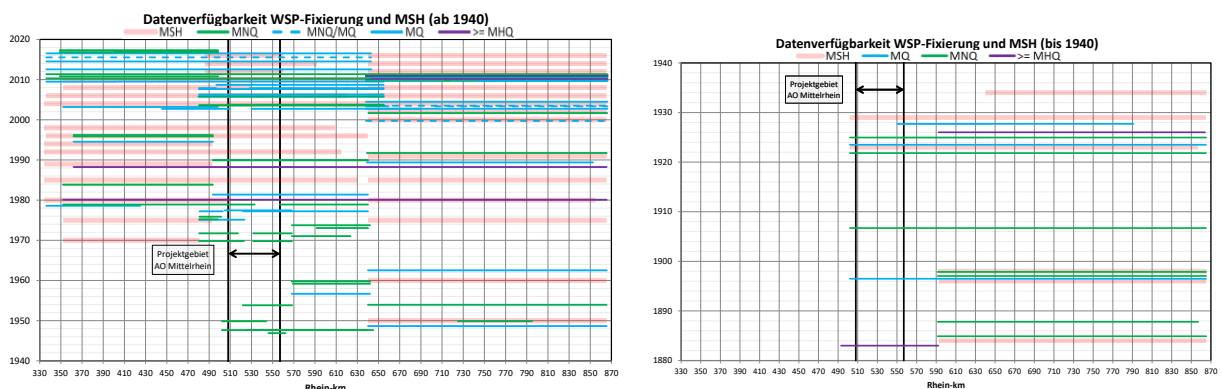


Abb. 3: Übersicht über Fixierungen u. Peilungen von 1880 bis 2020 an Mittel- u. Niederrhein

Für die Zeiträume um 1900, 1925, 1955, 1975, 1985, 2005 und 2015 ist die Datenverfügbarkeit hinsichtlich der Parameter MSH und $W(MNQ/MQ)$ hinreichend, so dass die Daten in sogenannten Epochen zusammengefasst werden konnten. Aus den Eingangsparametern MSH und $W(MNQ/MQ)$ wurde dann die Fließtiefe für jede Epoche berechnet; zeitlich also über einen Zeitraum von 120 Jahren in Intervallen von durchschnittlich 20 Jahren.

Der zeitliche Verlauf der Einzel-Parameter MSH (mittlere Sohlhöhe) sowie $W(MNQ)$ und $W(MQ)$ (Wasserspiegellagen von Niedrig- und Mittelwasser) kann darüber hinaus mit höherer Frequenz als nur für diese 7 Epochen abgebildet werden. Für den zeitlichen Verlauf der Niedrigwasserstände konnte für die gesamte freifließende deutsche Rheinstrecke mit einer deutlich größeren räumlichen Auflösung auch über 1890 hinaus die vertikale Bewegung der Niedrigwasserspiegel nachvollzogen werden (auf Basis der historischen Pegelaufzeichnungen sogar bis 1820 zurück). Im Folgenden werden exemplarische Auswertungen dargestellt für diesen Datensatz von bis zu 200 Jahren zeitlicher und 700 km räumlicher Ausdehnung.

3. Exemplarische Auswertungsdiagramme

3.1 Große Skalen über zwei Jahrhunderte und Flussgebiete

Da aus der Zeit vor 1880 keine räumlich durchgängigen Wasserspiegel-Fixierungen (sowie keine Peilungen) vorliegen, wurde der Versuch unternommen auf Basis von Pegelaufzeichnungen, so weit wie möglich in der Historie die Vertikalbewegung der Niedrigwasserspiegel-Lage zu rekonstruieren. Da das Niedrigwasser dem Flussbett folgt [1, 3], lässt sich hierüber auch auf die morphologische Entwicklung rückschließen. Mit der räumlichen Auflösung bzw. den Abständen zwischen Pegelstellen von im Mittel etwa 10 bis 30 km, lässt sich eine lokale (10¹ km) oder regionale (10² km) Betrachtung nicht sinnvoll abbilden. Jedoch ergibt sich auf Flussgebietskala (10³ km) mit dieser räumlichen Auflösung eine gewinnbringende Darstellung der Vertikalbewegung im Fluss Schlauch des freifließenden Rheines über rund zwei Jahrhunderte:

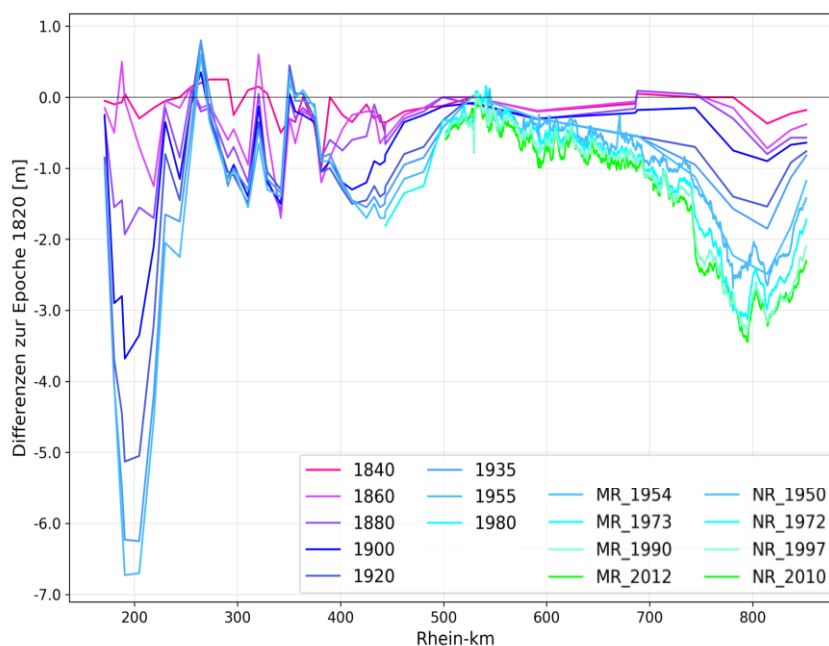


Abb. 4: Veränderung der Niedrigwasserspiegel-Lage im Rhein im Vergleich zu 1820

Abbildung 4 spiegelt auf Flussgebietsskala die Höhenlagenveränderung des Flussbettes und des ihm folgenden Niedrigwasserspiegels über den langen historischen Zeitraum von zwei Jahrhunderten wider. In der gesamten Strecke zwischen Basel und der Niederländischen Grenze hat sich der freifließende deutsche Rheinabschnitt fast durchgehend eingetieft und nur kurzzeitig lokal gering aufgehöhht. Während die Eintiefung in weiten Strecken relativ moderat verlief (im Bereich von 0,5 bis 1 cm Eintiefung pro Jahr), hat es historisch in drei großen Streckenbereichen (zunächst unterstrom Basel am heute stauregulierten oberen Oberrhein, dann unterstrom von Karlsruhe/Maxau mit Schwerpunkten in den Bereichen Speyer/Worms und am Niederrhein) Eintiefungen mit sehr viel höheren Erosionsraten von mehreren Zentimetern pro Jahr gegeben. Während diese Eintiefungen am Niederrhein durch intensives Sedimentmanagement insbesondere und am Oberrhein infolge der Stauregulierung gestoppt bzw. entscheidend reduziert wurden, wirkte die flussbauliche Regelung zusammen mit insb. Geschieberückhalt durch die Staustufen des Oberrheins und des Neckars etc. über viele Jahrzehnte bis über ein Jahrhundert nach durch den sogenannten morphologischen Nachlauf. Auch wenn die Eintiefungsrate mittlerweile abgeschwächt ist, kann dieser Nachlauf in einer typischen Fortgangsbewegung nach unterstrom (die auch am oberen Oberrhein nachvollziehbar war, aber nicht z.B. am Niederrhein) in jüngerer Zeit bis an und in den Rheingaubereich hinein erkannt werden. Im zeitlichen und räumlichen Mittel liegt die Eintiefungsrate des freifließenden Rheines damit bei etwa 1 cm/a. Ohne die schnellen Eintiefungen in den o.g. Bereichen, die jeweils auch 3 cm/a erreichten (und auch deutlich übertrafen unterstrom Basel im 19. Jhdt.), läge die Eintiefung im Rhein niedriger bei etwa 0,5 cm/a.

3.2 Datenfülle einzelner Rubriken, wie Sohlhöhen

Der gesamte Datensatz beinhaltet neben den Wasserspiegellagen-Daten auch Daten der Sohlhöhen zu diversen Zeitpunkten zwischen 1880 und heute.

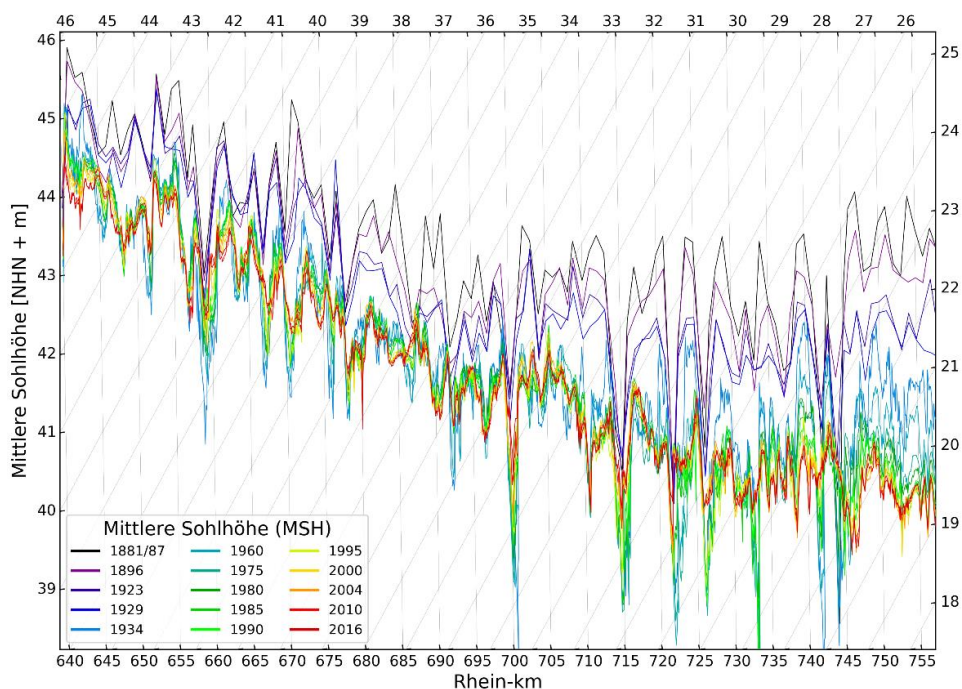


Abb. 5: Veränderung der mittleren Sohlhöhe (MSH) des Niederrheins von 1884 bis heute

Durch die Darstellung in Abb. 5 soll exemplarisch gezeigt werden, dass neben den o.g. großräumlichen sehr langfristigen Skalen auch sehr detaillierte Informationen und Betrachtungen aus Teildatensätzen erzeugbar sind. Die räumliche Auflösung der aus Peildaten berechneten mittleren Sohlage (MSH) ist viel höher; es liegen homogenisierte Datenreihen mit Abständen von 100 m und wenigen Jahren vor. Auf dieser Basis kann z.B. die direkte Flussbetteintiefung am Niederrhein der letzten 135 Jahre betrachtet werden (Abb. 5). Hierbei wird u.a. deutlich, dass die Sohlage des Niederrheins bis etwa Köln relativ stabil blieb bei eher moderater Erosion im Bereich von etwa 1 m. Hingegen ergibt sich gegenüber den 1880er Jahren eine Eintiefung von über 3 m. Die häufigen Peilungen in den letzten drei Jahrzehnten dokumentieren, dass im Rahmen der Wasserstraßenunterhaltung seit den 1990er Jahren keine signifikante weitere Eintiefung mehr entlang des Niederrheins hingenommen werden musste.

3.3 Aggregation von Sohlhöhe und Wasserspiegel zu Fließtiefen für best. Epochen

Der Datensatz ermöglicht weiterhin nicht nur die Darstellung und Analyse der einzelnen Parameter (MSH, MNW, MW) über Raum und Zeit, sondern auch die Verknüpfung dieser Daten zu wichtigen Parametern für die Nutzungsanforderungen an die Wasserstraße Rhein. Wenn z.B. die Differenz aus Niedrigwasserspiegellage und mittlerer Sohlage gebildet wird, lässt sich hieraus die mittlere Fließtiefe im Fahrwasserbereich ermitteln.

Dies ist über den vorgestellten Datensatz möglich sowohl für Niedrigwasser als auch für Mittelwasser und jeweils für mehrere Epochen zu denen sowohl Peilungen als auch Wasserstandsdaten vorlagen. Typischerweise resultieren eher bei Mittelwasser Fließtiefengewinne als bei Niedrigwasser, welches der Flusssohle, über lange Zeiträume betrachtet, häufig fast deckungsgleich folgt (korrespondierende langfristige Eintiefungsrate, vgl. auch Abb. 6). Die letzte Abbildung zeigt die Veränderungen der nutzbaren Fließtiefe über den vergleichbaren Zeitraum, hier aber als Beispiel für eine andere Flussstrecke, den Rheingau-Bereich bis in die Gebirgsstrecke hinein (bis etwa Oberwesel). Während an bestimmten Stellen die Fließtiefe fast unverändert ist, konnte ober- und unterhalb Bingen bis zu 1 m gewonnen werden.

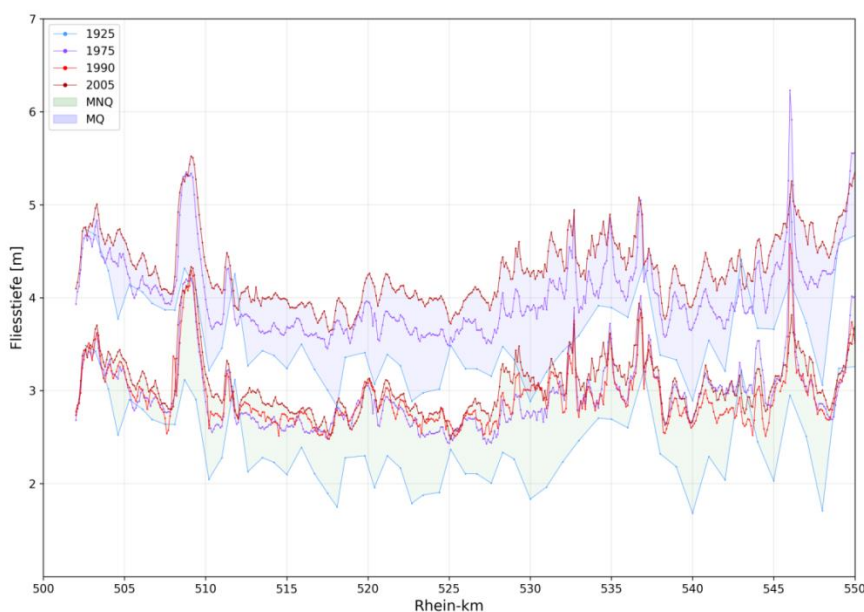


Abb. 6: Veränderung der Fließtiefe für Mittel- und Niedrigwasser im Rheingau und unterstrom

4. Weitere Verwendungen

Der vorgestellte Datensatz resultiert aus umfangreichen Recherchen, Digitalisierungsarbeiten und Plausibilisierungen der BfG/Gewässermorphologie. Die BfG hat diese historischen Datensätze nicht nur für den Rhein sondern auch für Elbe und Oder in ihrer Software FLYS [4] zusammengestellt und stellt mehrere Analysen zu relevanten Parametern für die schiff- fahrt-lichen und umweltbezogenen Nutzungsanforderungen zur Verfügung u.a. in einem Vergleich der gewässermorphologischen Entwicklung dieser Binnenwasserstraßen.

Literatur

- BfG, 2012. Wasserstandsänderungen im Zusammenhang mit der morphologischen Entwicklung an Oberrhein, mittlerer Elbe und Grenzoder, BfG-1767.
- BfG, 2017. Dokumentation der Digitalisierung von Wasserspiegelfixierungen des WSA Bingen. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Riedel, A.; Bengel, W., Willems, M., Koblenz.
- Busch et al., 2013. Neue Auswertemethode zum Nachweis von Wasserstandsänderungen im Zusammenhang mit der morphologischen Entwicklung an Bundeswasserstraßen – dargestellt am Beispiel der Mittleren Elbe. Hydrologie u. Wasserbewirtschaftung Heft 1.
- Datenportal Web-FLYS (v3.3.1) - Bundesanstalt für Gewässerkunde, 2013. FLYS goes WEB: Eröffnung eines neuen hydrologischen Fachdienstes in der BfG, Kolloquium am 15./16. Mai 2013 in Koblenz. BfG-Veranstaltungen 4/2013.
- Eschweiler W., 1952. Die Wasserspiegel- und Sohlensenkung am Niederrhein – ihr Verlauf und ihre Ursachen, Dissertation, Duisburg.
- Hinrich H., 1982. Gutachten über die Sohlhöhenveränderung des Rheins zwischen Plittersdorf und Bingen in der Zeit von 1880 bis 1980, BfG Koblenz.
- Jasmund, R., 1901. Die Arbeiten der Rheinstrom-Bauverwaltung 1851-1900, Denkschrift, Berlin.
- Rheinstromwerk, 1889. Der Rheinstrom und seine wichtigsten Nebenflüsse.

Messnetzkonzept Hydrologie NRW – Teil Niederschlag

Vera Schimetzek

Zusammenfassung

Der nachfolgende Artikel beschreibt die Vorgehensweise des Landes NRW bei der Aufstellung eines Messnetzkonzeptes für das Niederschlagswesen. Erläutert wird der Weg zur Ermittlung der notwendigen Messstellendichte und Anforderungen an die Messtechnik. Es werden erste Ansätze für Strategien zur Harmonisierung von Messnetzbetrieb, Datenerfassung sowie der Datenprüfung aufgezeigt, die im Detail noch weiter auszuarbeiten sind. Ohne Niederschlagsdaten keine Bilanzen - egal ob Starkregen oder Dürre. Den Niederschlagsdaten kommt in Zeiten des Klimawandels eine immer größer werdende Bedeutung zu. Umso wichtiger wird es, landesweit einen hochaufgelösten homogenen und belastbaren Datenpool zu generieren, der vielen Anwendungen gerecht wird. Es werden jetzt die Grundlagen für Bewertungen und Planungen nachfolgender Generationen geschaffen.

1. Veranlassung / Zielsetzung

Die Disziplin der Niederschlagsdatenerfassung ist eine äußerst heterogene Angelegenheit. Abgesehen davon, dass eine Vielzahl an parallel geltenden alten und neuen technischen Regeln existieren, die in der Menge dem Anwender den Überblick über die Materie eher erschweren, gibt es mindestens eine ebenso große Anzahl an Betreibern und Messnetzen mit unterschiedlicher Motivation und Zielrichtung bei der Datenerhebung. Unterschiedliche Philosophien beim Einsatz und Betrieb der Messtechnik sowie bei der Datenaufbereitung führen zu Inkonsistenzen bis hin zu Brüchen in den Messreihen und landesweit betrachtet zu einem inhomogenen Datenpool. Vielfach liegen jahrelang gemessene Daten auf Disketten bei manchem Betreiber in den Schubladen. Diese Schätze gilt es, noch zu heben und entsprechend auszuwerten.

Die Messung von Niederschlagsdaten durch das LANUV NRW erfolgt auf Basis der gesetzlichen Grundlage § 89 LWG (zu § 88 WHG) – Ermittlung der Grundlagendaten des Wasserhaushalts. Betrieben werden rund 240 Niederschlagsmessstellen mit kontinuierlicher hochauflösender Niederschlagsdatenerfassung (1-min-Auflösung). Der Betrieb des Messnetzes erfolgt von 10 Standorten aus, um bei Ausfällen mit kurzen Anfahrtszeiten schnell reagieren zu können. Die Daten werden an den Messstellen erfasst und anschließend an einen zentralen Server gesendet. Die Plausibilisierung und Aufbereitung erfolgt regional von den zuständigen Sachbearbeitern.

Erstes Ziel bei der Erstellung des Messnetzkonzeptes war zunächst die Harmonisierung des Messnetzbetriebs innerhalb der Landesbehörde nach der Verwaltungsstrukturreform 2008 und die Ermittlung der optimalen Stationsdichte zur Bewältigung der gesetzlich verankerten Aufgabe. Als zentrale Eingangsgröße wasserwirtschaftlicher Anwendungen dient die Ermittlung des Niederschlags beim Land u.a. als Grundlage für Bemessungen wasserwirtschaftlicher Anlagen, Gebührenberechnungen, Modelle (online: Hochwasserinformationsdienst, offline: Kartengrundlagen für Überschwemmungsgebiete, Hochwassergefahrenkarten), der Aneicherung von Radarniederschlagsdaten, Gutachtenerstellung und der Öffentlichkeitsinformation.

Des Weiteren werden Niederschlagsdaten in NRW von verschiedenen Organisationen (DWD, private Wetterdienste, Verbände, Kommunen) mit unterschiedlichen Zielsetzungen ermittelt.

Um eine landesweit vergleichbare Datenbasis zu generieren, die zusammengeführt werden kann und möglichst viele Anwendungen abdeckt, ist eine Standardisierung des Messbetriebs und der Datenprüfung dringend anzuraten. Hierzu muss im Land ein allgemein gültiger Standard entwickelt und vorgelebt werden.

Die Zielsetzung des Messnetzkonzeptes Niederschlag ist es, eine systematische Erfassung des Niederschlags in NRW und einen standardisierten Messbetriebs der Partnermessnetze zu ermöglichen, mit dessen Hilfe eine einheitliche valide Datengrundlage generiert wird. Diese Daten sollen den Anforderungen zur Erfüllung der o.g. Aufgaben genügen und das Niederschlagsgeschehen in NRW in der Fläche abbilden. Dieses Ziel wird durch das Aufstellen des Messnetzkonzeptes und weiteren Maßnahmen erstmals in NRW verfolgt.

2. Methodik und Inhalt

2.1 Messnetzkonzept

Verteilungsdichte und Kategorisierung:

Die Festlegung der für die Aufgaben des Landes notwendigen Verteilungsdichte an Messstellen erfolgte auf Basis der im DWA Merkblatt 230 gelisteten Richtwerten für die Aufgabe Hochwasserschutz für Einzugsgebiete von 200 bis >1000 km². Hieraus ergab sich eine Anforderung von rund 1,5 Messstellen / 100km². Die Wahl der Verteilungsdichte erfolgte darauf aufbauend mit der Maßgabe, eine Messstelle pro KOSTRA-Raste4 (71,5 km², KOSTRA-DWD 2000) aufzustellen. Mit dieser Vorgabe wird sowohl dem Richtwert der LAWA entsprochen als auch ein sinnvoller fachlicher Bezug zu den Messungen des DWD hergestellt. Bei regelkonformem Betrieb können diese Messstellen langfristig als Stützstellen für die Starkregenauswertungen für KOSTRA herangezogen werden. Dieser Bedarf kann nicht allein durch die Messungen des Landes gedeckt werden (vgl. hierzu Abb. 1 und 2). Aus diesem Grund wurden bei der Ermittlung der Messstellen von vorne herein die Messstellen aus den Messnetzen von DWD, Verbänden und einiger Kommunen in die Betrachtungen mit einbezogen.

Bei weiterer Betrachtung der Niederschlagsverteilung aus Karten des Klimaatlas NRW zeigte sich aber auch, dass in Regionen, in denen die jährliche Niederschlagsvariabilität benachbarter KOSTRA-Raster einen Wert von 50 mm/a unterschreitet, z.T. auf den Betrieb einer Messstelle verzichtet werden kann. In diesem Fall werden die Messungen aus dem benachbarten Raster für das untersuchte Raster herangezogen. Die nach diesem Verteilungsmuster festgelegten Messstellen bilden das Grundmessnetz (G) des Landes NRW. Stationen, die als Bezugsgröße einem Einzugsgebiet einer Pegelmessstelle der Kategorie Grundmessnetz nach dem Messnetzkonzept Hydrologie NRW, Teil Pegel, zugeordnet sind, zählen ebenfalls zum Grundmessnetz.

Variiert innerhalb einer Rasterfläche jedoch die jährliche Niederschlagssumme um mehr als 200 mm/a, so ist das Aufstellen einer zusätzlichen Station erforderlich, um das Niederschlagsgeschehen in diesem Rasterfeld ausreichend abzubilden. In diesem Fall handelt es sich bei den zusätzlichen Stationen um Messstellen des Verdichtungsmessnetzes (V).

Alle weiteren Messstellen, die nicht unter die beiden genannten Kategorien subsummiert werden können, zählen nach Maßgabe der o.g. Aufgabe Hochwasserschutz zum Sondermessnetz (S).

Neben Verteilungsdichte und Kategorisierung werden im Messnetzkonzept weitergehende Aussagen zur Grundausstattung, Anforderungen an die Datenqualität und Kontroll- sowie Freigabeintervalle der Messdaten getroffen.

2.2. Ausstattungskonzept

Das seit 2016 in Arbeit befindliche Ausstattungskonzept ist Teil des Messnetzkonzepts und dient der Standardisierung der messtechnischen Ausstattung und elektrotechnischer Komponenten für optimierten Betrieb, Lagerhaltung und Vereinfachung von Vergabeverfahren. Eine weitgehend einheitliche Konfiguration soll dafür sorgen, dass in allen Teilen des Landes auch Personal ohne elektrotechnische Fachausbildung in der Lage ist, die wichtigsten Wartungstätigkeiten werkzeugfrei durchzuführen.

Das Ausstattungskonzept könnte eine Vorbildfunktion für Partnermessnetze übernehmen. Ausstattung und Konfiguration sollen in 2019 im Rahmen eines BMWI-Förderprojekts Kommunal 4.0 erprobt und optimiert werden.

Inhaltlich beschreibt das Ausstattungskonzept Anforderungen an Sensorik, Komponenten und Datenfernübertragung. Die Sensorik sollte auch für den Betrieb als Partnermessnetz des DWD zugelassen sein, da die Stationen Daten für die Online-Aneicherung der Radarniederschlagsdaten zuliefern und dessen Messnetz ergänzen.

Weitere nicht unerhebliche Faktoren für die Sensorauswahl sind neben der erforderlichen Auflösung Wartungsfreundlichkeit, Dauerhaftigkeit (Betriebsdauer mindestens 10 Jahre) und geringer Stromverbrauch, da ein größerer Teil der Messstellen in ländlichen Gebieten nicht an Standorten mit entsprechender Infrastruktur untergebracht werden kann. Im Bereich der Sensorik terrestrischer Niederschlagsmessungen fehlt es an echten Innovationen oder Alternativen zu auf dem Markt befindlicher Messtechnik.

Um die Entwicklungen in der Messtechnik verfolgen und eigene Erfahrungen im Messbetrieb sammeln zu können, wird seit 2018 eine Teststellung betrieben. Langfristig ist der dauerhafte Betrieb eines Testfeldes geplant.

3. Ergebnisse der Bestandsaufnahme

Auf Basis der unter 2.1. beschriebenen Kategorisierung wurde eine Bestandsaufnahme der im Land NRW betriebenen Niederschlagsmessstellen (LANUV, DWD, Verbände und Kommunen mit validen Messnetzen) durchgeführt und die Stationen den 483 KOSTRA-Rastern zugeordnet. In zwei weiteren Schritten wurde der Bedarf und Ist-Stand mit den Bezirksregierungen und den Wasserverbänden abgeglichen. Eine Abstimmung mit den Kommunen steht noch aus.

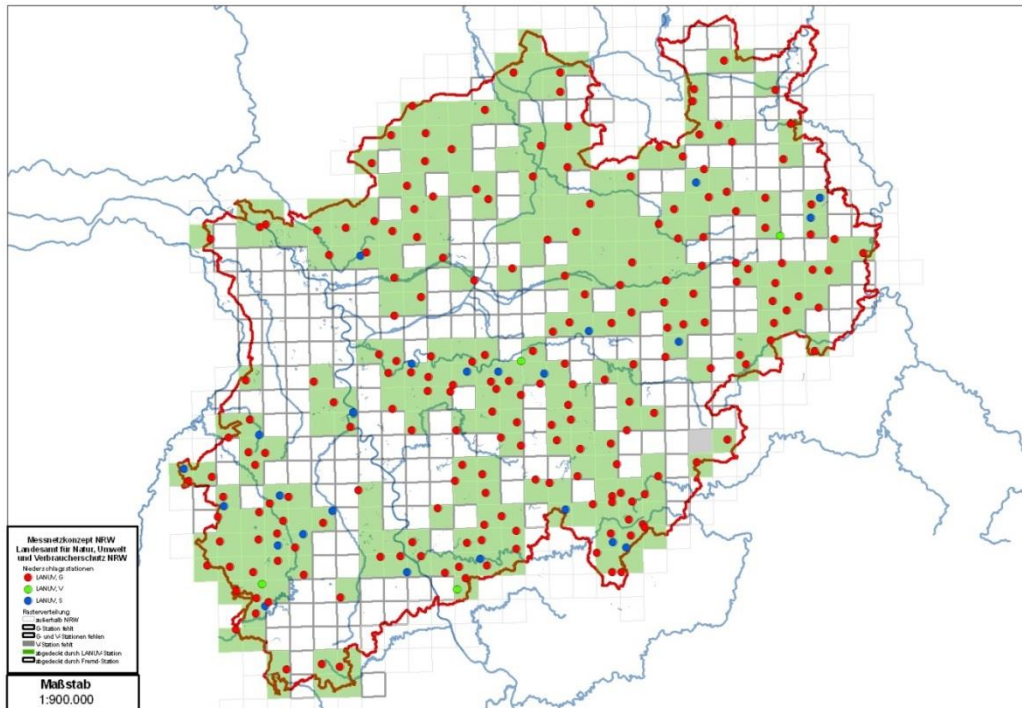


Abb. 1: Ergebnis Bestandserhebung und Messstellenabdeckung mit Stationen des LANUV NRW

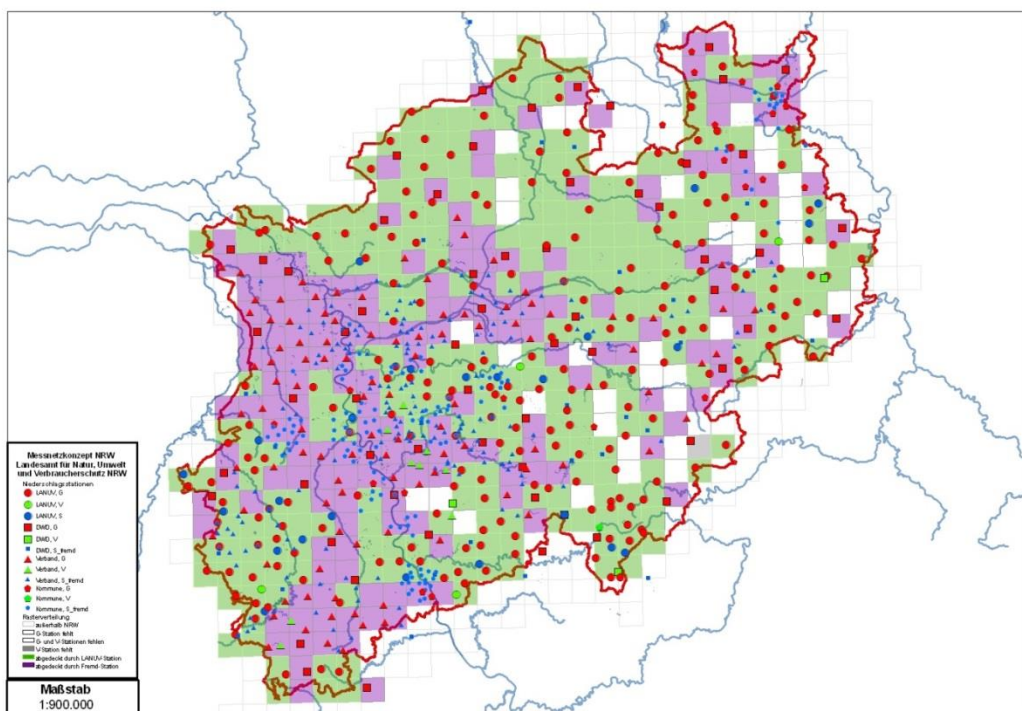


Abb. 2: Ergebnis Bestandserhebung und Messstellenabdeckung mit Partnermessnetzen

Tab. 1: Das Ergebnis der Bestandsaufnahme in tabellarischer Darstellung

Betreiber	Anzahl Messstellen	G-Messnetz	V-Messnetz	S-Messnetz
LANUV NRW	239	211	4	24
DWD	94	61	3	30
Verband	295	104	9	182
Kommune	148	21	1	126
Gesamt	776	397	17	362

Tab. 2: Ergänzungsbedarf

Anzahl Messstellen	G-Messnetz	V-Messnetz	S-Messnetz
54	46	8	0

Die aus der Bestandserhebung ersichtliche Unterdeckung in einigen Bereichen des Landes wurde ebenfalls in anderen Untersuchungen (u.a. ExUS) und bei der Aneicherung der Radarniederschlagsdaten bestätigt. Die dargestellten weißen Flächen sind noch mit weiteren Messstellen als Stütze zu belegen.

4. Konsequenzen für den Betrieb und die Ausstattung der Messstellen

Bei der Sensorik wird im Niederschlagswesen nicht in den einzelnen Messnetzkatgorien unterschieden, weil alle Messstellen grundsätzlich allen Anforderungen genügen sollten. Diese orientieren sich einerseits am Betrieb im Partnermessnetz des DWD und andererseits an den Anforderungen der Stadtentwässerung mit einer hohen zeitlichen und messtechnischen Auflösung. Eine Redundanz ist derzeit noch nicht vorgesehen. Sie ist aber für besonders bedeutsame Messstellen wie z.B. die DWD-Zulieferungsstationen und Stationen des Hochwasserinformationsdienstes anzustreben.

Grundsätzlich muss eine zuverlässige, wartungsarme und technisch hochwertige Ausstattung mit modularer Konfiguration dafür sorgen, dass die Anzahl der Wartungs- und Kontrollintervalle auf maximal 4 Termine pro Jahr reduziert werden kann.

Da die Niederschlagsdatenerfassung über die Aufsummierung besondere Anforderungen an die Datenverarbeitung stellt, werden derzeit bei Datenloggern Hersteller mit langjähriger Erfahrung bei Niederschlagsdatenerfassung und –management bevorzugt.

Die tägliche Routinekontrolle erfolgt per Visualisierung der per Datenfernübertragung gelieferten Daten und Betriebsparameter.

Zielsetzung beim Betrieb der Messstellen ist es, eine maximale Ausfallsicherheit für eine lückenlose Datenerfassung mit einer maximal möglichen Rohdatenqualität zu erreichen. Damit soll der im Niederschlagswesen erhebliche Aufwand bei der Datenrekonstruktion von Lückenbereichen minimiert werden. Größere Erfassungsausfälle führen zum Bruch in der Zeitreihe bis hin zur Unverwendbarkeit derselben. Untersuchungen auf Basis der langjährigen Zeitreihen des Landes (z.B. in ExUS) deuten auf Brüche in den Zeitreihen aufgrund von Wechsel der Messtechnik bzw. Digitalisierungstechnik hin. Dies gilt es noch genauer zu verifizieren. Rekonstruktionen bilden niemals die Realität ab und führen zu Problemen bei der

Modellierung. Eine hohe Rohdatenqualität ist grundsätzlich für den stetig zunehmenden Betrieb von Online-Datenbereitstellung und den Betrieb von Modellen zwingend erforderlich.

5. Optimierungsmöglichkeiten

Für eine optimierte Nutzung sollte das Messnetz für weitere Anwendungsfelder geöffnet und auf eine breitere Kundenbasis umgestellt werden. Eine Erweiterung um speziell auf verschiedene Fragestellungen zugeschnittene Informationsangebote sollte in Betracht gezogen werden.

Die Hinzunahme weiterer Klimasensorik wie z.B. Lufttemperatur, -druck und -feuchte sowie Winddaten, Strahlungs- und Bodenparameter sorgen nicht nur für eine Verbesserung der hydrologischen Modelldaten und Ergänzung bestehender Messnetze, sondern liefern auch weitere Grundlagendaten für Anwendungen wie z.B. Stadtentwässerung, Agrarmeteorologie und Klimatologie. Der Ausbau eines Niederschlagsmessnetzes zur Hydrometeorologie sorgt dafür, dass unterschiedliche Zielsetzungen optimal in einem Messnetz zusammengeführt und bedient werden können.

Bezüglich der zu erreichenden Datenqualität wird ein wesentliches Verbesserungspotential in einem standardisierten Messbetrieb und einer vereinheitlichten Datenprüfung gesehen. Ein weiterer Schritt hierbei wird auch eine automatisierte Vorplausibilisierung der Daten bei der Übernahme aus der Messstelle darstellen.

Als wesentliche organisatorische Maßnahmen sind zu benennen:

- Schulung aller Messnetzbetreiber zur Verbesserung des Messbetriebs (Planung, Bau und Betrieb) und der Dokumentation bewirkt eine Optimierung der Rohdatenqualität
- Modernisierung der Standards für die Datenprüfung und-aufbereitung und Schulung der Datenprüfer führt zu einer homogenen, verbesserten Datenqualität
- Bereitstellen von Fachwissen und Arbeitsanleitungen auf einem Wiki-Portal, zentrale Beratung und Austauschforen sorgen dafür, dass Kompetenz in der Fläche verbreitet wird.
- Optimierung von Datenwegen, Bereitstellung auf einer gemeinsamen Datenplattform für einen schnellen Austausch, einheitliche Schnittstellen

Ein weiterer wesentlicher Punkt bezüglich der Bereitstellung von Niederschlagsinformationen in der Fläche ist die Hinzunahme von Radarniederschlagsdaten. Hierzu wurde eine Kooperation zwischen dem LANUV NRW und den sondergesetzlichen Wasserverbänden geschlossen, in der diese Daten gemeinsam für NRW aufbereitet werden.

Es ist geplant, zukünftig alle landeseigenen Daten und die aufbereiteten Radarniederschlagsdaten der verbandsfreien Gebiete über Open-Data-Bereitstellung zu veröffentlichen.

Unter den hier genannten Optimierungsaspekten ist das Messnetzkonzept noch einmal zu neu zu bewerten, zu überarbeiten und weiter fortzuschreiben.

Literatur

DVWK (Hg.), 1994. DVWK 230 Niederschlag – Empfehlungen für Betreiber von Niederschlagsstationen (BETREN), Bonn.

DWD (Hg.), 2005. KOSTRA-DWD-2000 Starkniederschlagshöhen für Deutschland (1951–2000) – Grundlagenbericht, Offenbach/Main.

- LANUV NRW (Hg.), 2010. Extremwertstatistische Untersuchung von Starkniederschlägen in NRW (ExUS) – Veränderung in Dauer, Intensität und Raum auf Basis beobachteter Ereignisse und Auswirkungen auf die Eintretenswahrscheinlichkeit – Abschlussbericht, Recklinghausen.
- LANUV NRW (Hg.), 2010. Klimaatlas NRW, Recklinghausen.
- LANUV NRW (Schimetzek, V. , Mennerich, E.), 2013. Messnetzkonzept Hydrologie NRW - Teil Niederschlag, Düsseldorf.
- LANUV NRW (Brinkmann, M., Brügger, C., Hummel, E., Marton, M., Teubner, I.), 2013. Messnetzkonzept Hydrologie NRW - Teil Pegel, Düsseldorf.

Weiterführende Literatur:

- DVWK, 1988. DVWK 126. Niederschlag - Anweisung für den Beobachter an Niederschlagsstationen (ABAN 1989), Hennef.
- DWA (Hg.), 2011. DWA-A 530 Beobachteranleitung für nebenamtliche Niederschlagsstationen Nst (A) und Nst (k) (BAN), Hennef.
- DWA (Hg.), 2011. T2-2017 Niederschlagserfassung durch Radar und Anwendung in der Wasserwirtschaft, Hennef.
- DWD (Hg.), 1999. MANOB - Mindestanforderungen an automatische Niederschlagsmessgeräte (Ombrometer) und deren Betrieb – Richtlinie des Deutschen Wetterdienstes unter Beteiligung von Vertretern des ATV, DVWK und LAWA, Offenbach/Main.
- DWD (Hg.), 2015. KOSTRA-DWD-2010 Starkniederschlagshöhen für Deutschland (Bezugszeitraum 1951 bis 2010) – Abschlussbericht, Offenbach/Main.
- DWD (Hg.), 2015. Einheitliche Beobachteranleitung für nebenamtliche Stationen (EBAN), Offenbach/Main.
- DWD (Hg.), 2015. Vorschriften und Betriebsunterlagen Nr. 3 (VuB 3) Technikerhandbuch (THB) für Wettermeldestellen des synoptisch-klimatologischen Mess- und Beobachtungsnetzes.
- DWD (Hg.), 2017. Richtlinie Automatische nebenamtliche Wetterstationen im DWD, Offenbach/Main.
- DWD (Hg.), 2017. KOSTRA-DWD-2010R Bericht zur Revision der koordinierten Starkregen regionalisierung und -auswertung des Deutschen Wetterdienstes in der Version 2010, Offenbach/Main.
- DWD (Hg.), 2005. KOSTRA-DWD-2000 Starkniederschlagshöhen für Deutschland (1951–2000) – Fortschreibungsbericht, Offenbach/Main.
- VDI (Hg.), 2010. VDI 3786 Blatt 7 Umweltmeteorologie; Meteorologische Messungen; Niederschlag. Berlin.
- VDI (Hg.), 2006. VDI 3786 Blatt 13 Umweltmeteorologie; Meteorologische Messungen; Messstation (Environmental meteorology; Meteorological measurements; Measuring station), Berlin.
- VDI (Hg.), 2014. VDI 3786 Blatt 20 Umweltmeteorologie; Bodengebundene Fernmessung des Niederschlags; Wetterradar, Berlin.
- WMO (Hg.), 2014. WMO-No. 8 Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, Geneva.

mobile^{VIEW} – Sensorgestützte Niederschlags erfassung aus fahrenden Fahrzeugen für die Echtzeit-Verdichtung von Niederschlagsinformationen

Mark Braun, Gesa Kutschera, Sajjad Tabatabaei, Matthias Pätsch, Etienne Costa-Patry, Sven Holzendorf, Daniel Eckardt, Kay-Jochen Langeheinecke, Angela Pfister, Adrian Treis, Dimitri Falk

Zusammenfassung

Starkniederschlagsereignisse haben in Deutschland in den letzten Jahren zu vielen wirtschaftlichen und persönlichen Schäden geführt. Gerade im Kurzfristbereich ist die raum-zeitliche Vorhersage von Starkniederschlagsereignissen aktuell mit vielen Unsicherheiten verbunden. Das Forschungsprojekt mobile^{VIEW} zielt auf eine räumliche und zeitliche Verdichtung von Niederschlagsinformationen ab. Dabei werden fahrende Fahrzeuge als mobile Sensorträger genutzt. Die von heutigen Fahrzeugen bereits automatisch erhobenen Daten sollen zukünftig in Echtzeit an eine IoT-Plattform gesendet werden, auf der sie aggregiert, analysiert und mit Stations- und Radardaten verknüpft werden. Die verdichteten Daten dienen als Eingangsdaten u.a. für hydrologische Modelle. Durch ihre Nutzung profitieren nicht nur administrative Einheiten (z.B. Wasserverbände, Katastrophenschutz), sondern auch Unternehmen und Privatpersonen.

1. Einleitung

Die vergangenen Jahre waren durch eine große Anzahl von Starkniederschlagsereignissen geprägt, die teils zu immensen Sach- und Personenschäden geführt haben (GDV, 2019). Auch im Jahr 2018 waren in Deutschland zahlreiche Städte von Starkregenereignissen betroffen, u.a. Aachen, Wuppertal und Hamburg. Durch den fortschreitenden Klimawandel ist in Zukunft eine Zunahme dieser Ereignisse zu erwarten (IPCC, 2013; Mohr, Kunz, & Keuler, 2015). Eine besondere Herausforderung im Hinblick auf das Auftreten von Starkniederschlägen ist die zeitliche, räumliche und quantitative Vorhersage dieser Ereignisse auf der Basis bestehender Wettermodelle. Für die Akteure betroffener Regionen führt dies zu einer sehr kurzen Reaktionszeit zur Ergreifung von Maßnahmen.

Überflutungen als Folge von Starkniederschlagsereignissen sind nicht zwangsweise an ein Gewässer oder spezielle topografische Bedingungen geknüpft, sondern können insbesondere in dicht besiedelten urbanen Regionen mit hohem Schadenspotenzial beispielsweise auch aus überlasteten Kanalsystemen auftreten. Die messtechnische Erfassung erfolgt derzeit vorwiegend auf Basis von terrestrischen Messstationen und Wetterradaren. Messwerte terrestrischer Stationen stellen in diesem Zusammenhang punktuelle Messungen dar. Die Qualität der aus den Punktmessungen abgeleiteten Gebietsniederschläge ist dabei auch von der Dichte und Verteilung des Messstellennetzes abhängig, die regional unterschiedlich ausfallen. Konvektive Ereignisse mit einer geringen räumlichen Ausdehnung werden daher häufig nicht vollständig vom terrestrischen Messnetz erfasst, wohingegen Radarmessungen als indirekte Messverfahren spezifischen Fehlerquellen wie z.B. Dämpfungseffekten unterliegen, die zu einer Unterschätzung des Ereignisses führen können (Pfister, Treis, & Teichgräber, 2015). Niederschlagsradarprodukte liegen zudem nur in unterschiedlichen Messintervallen von fünf Minuten bis zu einer Stunde vor (DWA, 2017).

2. Ansatz des Forschungsprojektes mobile^{VIEW}

An dieser Stelle setzt das Forschungsprojekt mobile^{VIEW} an, welches sich mit der Verdichtung von Niederschlagsinformationen durch die Nutzung von Sensordaten aus fahrenden Fahrzeugen befasst. Heutige Fahrzeuge erheben eine Vielzahl von Umgebungsdaten und fungieren so als mobile Sensorträger. Auf die Niederschlagsmenge kann über eine Kombination aus der Scheibenwischerfrequenz und optoelektronisch generierten Niederschlagsinformationen über die auf die Scheibe auftreffenden Regentropfen geschlossen werden. Bestandteil des Forschungsprojektes ist die Untersuchung der Eignung dieser Informationen im Kontext von Starkregenvorhersagen, um das große Potenzial, bedingt durch die Vielzahl von Fahrzeugen, für die Zukunft nutzbar zu machen. Eine Herausforderung neben der Bereitstellung einer Vielzahl an Sensordaten (Big Data) in Echtzeit ist die Überlagerung, Vernetzung und Analyse zur Gewinnung eines Mehrwerts für die Erfassung des Niederschlagsgeschehens sowie für Wetterprognosen im Kurzzeitbereich (Nowcasting) (vgl. Abb. 1).

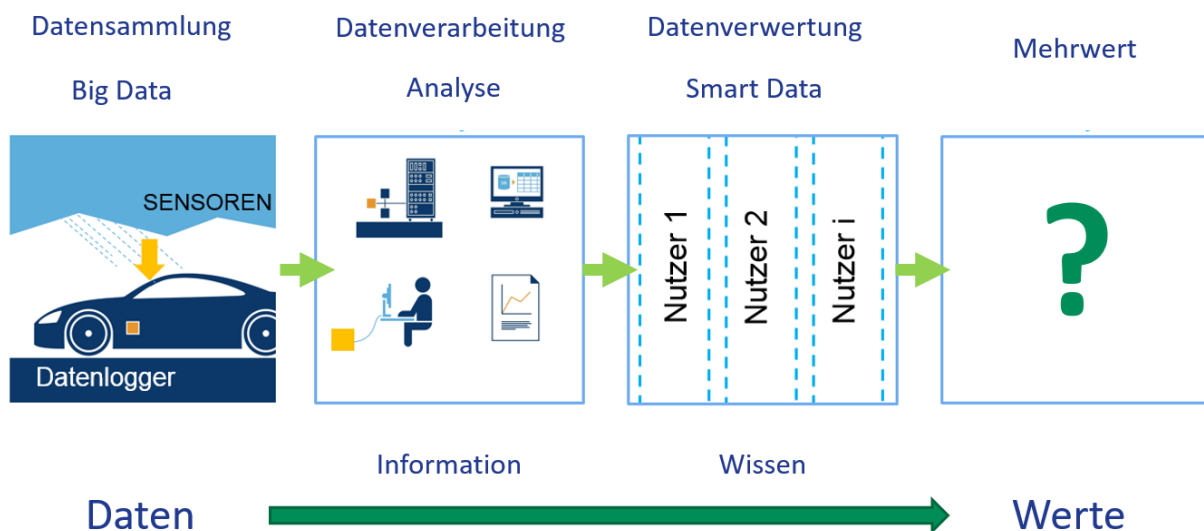


Abb. 1: Schematische Darstellung der Generierung von Mehrwerten aus Rohdaten (Quelle: IAV)

Im Rahmen der vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) geförderten Forschungsinitiative „mFUND“ entwickelt das mobile^{VIEW}-Konsortium, bestehend aus dem Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RWTH Aachen (FiW) e. V., Emschergenossenschaft und Lippeverband (EGLV) und der Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr (IAV) GmbH, ein Konzept zur systematischen Verdichtung von Echtzeit-Niederschlagsinformationen im Emscher- und Lippe-Gebiet. Der gewählte Untersuchungsraum umfasst die Verbandsgebiete von EGLV mit einer Gesamtfläche von 4.145 km² und ist charakterisiert durch hochverdichtete urbane, aber auch landwirtschaftlich geprägte Regionen. Somit ist ein großes Transferpotenzial für andere Regionen gewährleistet. EGLV betreiben in ihren Verbandsgebieten ein eigenes terrestrisches Messnetz. Im Rahmen einer Kooperation mit dem Deutschen Wetterdienst (DWD) kann zudem auch auf zusätzliche Produkte, wie Radarniederschlagsdaten, Vorhersagemodell und weitere Messdaten, zugegriffen

werden. Abbildung 2 zeigt das EGLV-Messnetz und den Standort des Radars Essen, die als Input für das Forschungsprojekt verwendet werden.

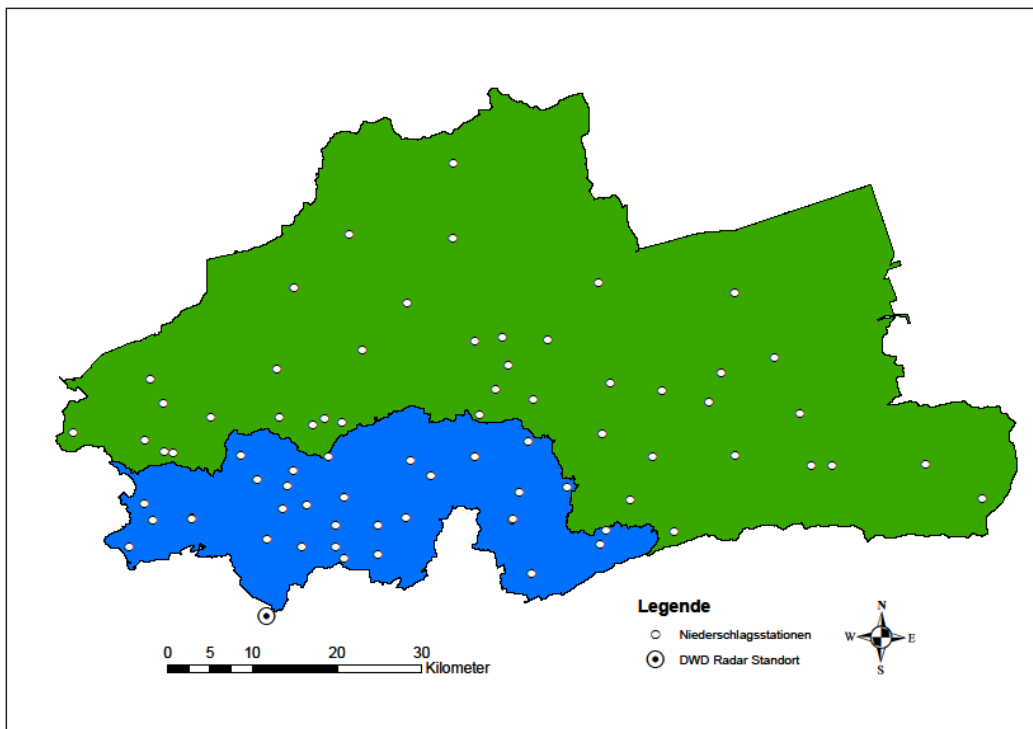


Abb. 2: Radarstandort und Standorte der Niederschlagsstationen im EGLV-Gebiet (Quelle: EGLV, DWD)

3. Projektverlauf

Erste Meilensteine des dreijährigen Forschungsprojektes konnten bereits erreicht werden. Für die Datenerhebung im EGLV-Gebiet stehen dem Konsortium 100 Fahrzeuge aus der EGLV-Flotte zur Verfügung. Geeignete Kfz-Standorte wurden nach Kriterien der räumlichen Abdeckung der Einzugsgebiete sowie deren naturräumliche Variabilität und Siedlungsstruktur gewählt (Treis et al., 2018). Da es sich bei der Erhebung der für eine Analyse notwendigen Ort- und Zeitstempel um personenbezogene Daten handelt, wurde zunächst ein DSGVO-konformes Vorgehen bei der Datenübertragung und -speicherung für mehr als 1.000 Mitarbeiter von EGLV sichergestellt. Alle potenziellen Fahrzeugführer wurden im Vorfeld über die Erhebungsmethoden und Zielsetzungen des Projektes informiert und um Einwilligung in die Erhebung und Verarbeitung ihrer personenbezogenen Daten gemäß Artikel 6 Abs. 1 lit. A DSGVO gebeten. Mittels eines in den Fahrzeugen angebrachten QR-Codes kann ein Fahrzeugführer mit seinem Handy jederzeit die Aufzeichnung der GPS-Position für einen bestimmten Zeitraum deaktivieren. In diesen Fällen erfolgt keine Übermittlung der Daten an den gemeinsamen Server. Eine nachträgliche Löschung von aufgezeichneten Daten kann jederzeit vorgenommen werden.

Ein weiterer Meilenstein war die Ausstattung der Fahrzeuge des EGLV-Fuhrparks mit einer geeigneten Übertragungstechnik für eine kontinuierliche Datenerhebung in Echtzeit.

Übertragungstechnik

Die Übertragung relevanter Daten aus den Fahrzeugen von EGLV erfolgt mit in der Automobilindustrie eingeführten und zertifizierten elektronischen Bauteilen, die in eine von der IAV entwickelten Mess-, Übertragungs- und Speicherkette integriert wurden (vgl. Abb. 3).

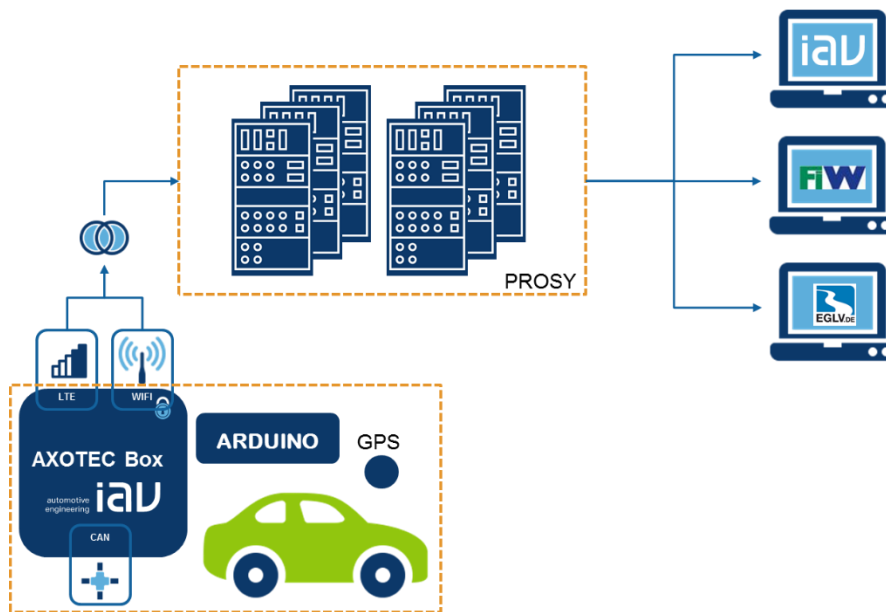


Abb. 3. Konzept der implementierten Messkette: Mess-, Übertragungs- und Speicherkette (Quelle: IAV)

Kernstücke der Messkette sind der Messkopf zum sicheren kontaktlosen Abgriff der CAN-Informationen (CAN = Controller Area Network), die Datenvorverarbeitung und Übertragung mittels eines industrietauglichen Einplatinen-Computers (Axotec-Box) sowie die drahtlose Car2X-Kommunikation an das produktive Rechner-Verbundsystem PROSY (vgl. Abb. 3). PROSY ist eine für das Projekt entwickelte, vernetzte Plattform für skalierbare, flexible, sichere und portierbare Datenanalytik.

Das Auslese- und Übertragungskonzept (CAN-Bus) wurde in Form eines kontaktlosen Zugriffs (vgl. Abb. 4 rechts) realisiert, um eine Beeinträchtigung der Allgemeinen Betriebserlaubnis der Fahrzeuge zu vermeiden.



Abb. 4. Fotos von der Einbauphase: verbauter Regensensor hinter der Windschutzscheibe, Verkabelung für Datenabgriff und Datenübertragung (Quelle: EGLV)

Die folgenden Parameter werden im Rahmen des Projektes aufgezeichnet: Ort- und Zeitstempel, Regenintensität, Wischfrequenz, Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck, Lichtintensität und Fahrgeschwindigkeit. Dafür werden die Messwerte an eine eigens dafür entwickelte Internet-of-Things-Plattform (IoT-Plattform PROSY) übertragen und dort aggregiert, analysiert und visualisiert. Der Schwerpunkt der Analyse liegt auf den mit Niederschlag verbundenen Sensordaten Scheibenwischerfrequenz und Reflektivität der Regensensoren (vgl. Abb. 4 links).

In der momentanen Projektphase werden diese Sensordaten auf Vollständigkeit, Plausibilität und Güte untersucht. Durch die Verknüpfung mit Daten von stationären Messeinrichtungen, Radarniederschlagsdaten und Produkten der numerischen Wettervorhersage soll das Ziel erreicht werden, einen Mehrwert der raum-zeitlichen Niederschlagserfassung gegenüber den Einzelprodukten zu generieren. Die veredelten Daten dienen u.a. als Eingangsgrößen für hydrologische Modelle und zur Verbesserung des Nowcastings.

Eine Bereitstellung anonymisierter Sensordaten und weiterer daraus mittels Expertensystem abgeleiteter Daten für interessierte Anwender ist über cloudbasierte Dienste und ggf. über eine App in Bearbeitung.

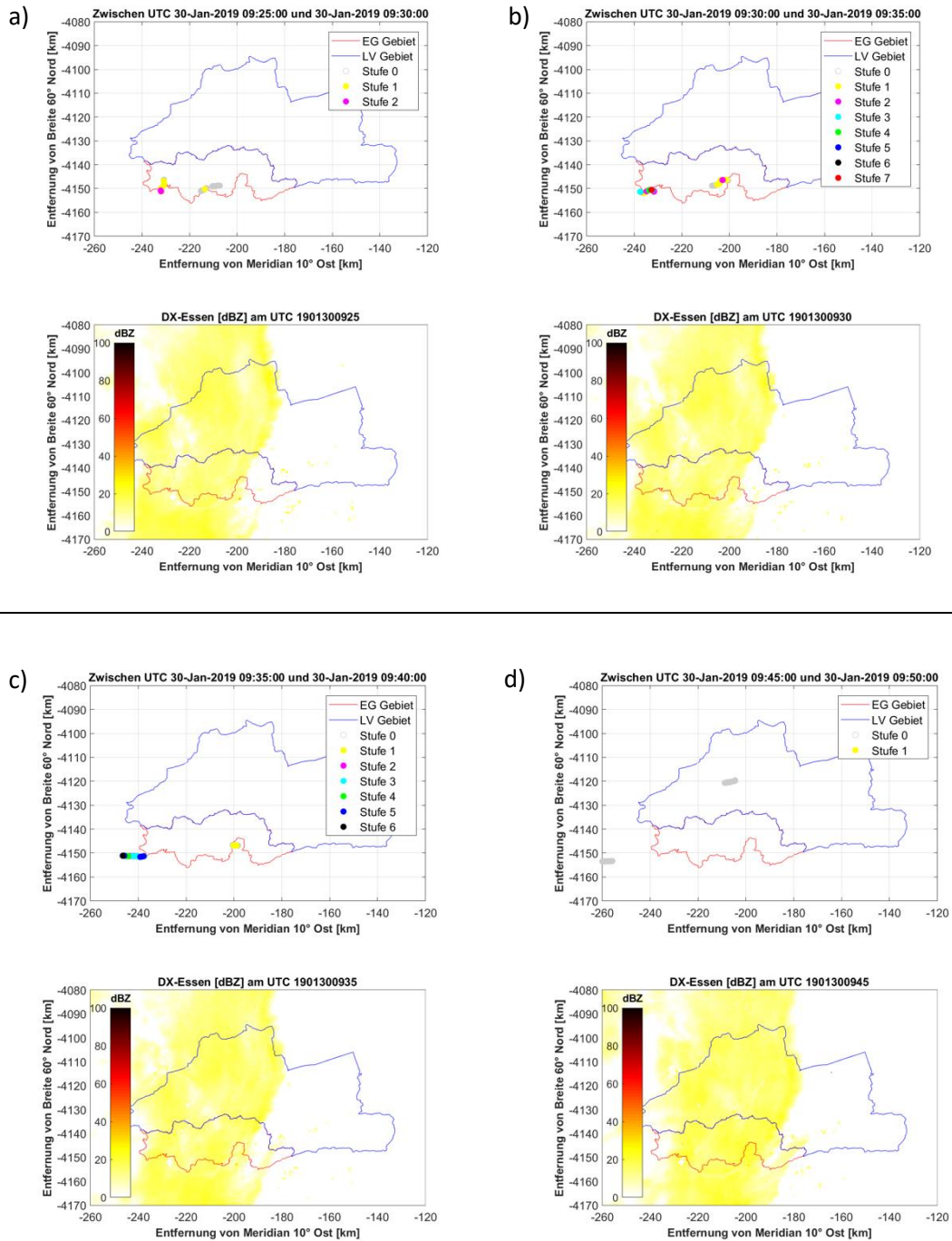
Erste Ergebnisse

Die nachfolgenden vier Abbildungen zeigen erste Ergebnisse (vgl. Abb. 5a–5d).

Dargestellt in den Abbildungen 5a) bis d) sind vier Messintervalle à jeweils fünf Minuten. Das obere Bild zeigt jeweils die aktuelle Verteilung von Fahrzeugen im Gebiet mit zugehöriger Höhe einer „Wischstufe“, welche automatisch vom Fahrzeug eingestellt bzw. empfohlen wird. Darunter sind DX-Radardaten des DWD dargestellt. Diese zeigen die Niederschlagsverteilung mit dem Schwerpunkt über den westlichen Verbandsgebieten. Der Vergleich zwischen Wischstufen der Fahrzeuge und den Radar-Reflektivitäten zeigt deutliche Schwankungen der Wischstufen bei gleichzeitig annähernd konstanten Reflektivitäten des DX-Produktes über den Zeitraum von 09:25 (5a unten) bis 09:50 UTC (5d unten).

Die Daten sind zu diesem Zeitpunkt noch nicht quantitativ ausgewertet, so dass eine Bewertung an dieser Stelle noch nicht stattfinden kann. Deutlich wird jedoch bereits zu diesem frühen Zeitpunkt die ausgeprägte Eigenschaft der eingesetzten Messkette, als Sensoren lokale Daten zu erzeugen. Wie diese gemeinsam mit Daten aus dem Niederschlagsradar und terrestrischen Messstationen analysiert und bewertet werden können, ist eine Aufgabe im weiteren Verlauf des Forschungsprojektes.

Fahrten am 30.01.2019 von 09:25 bis 09:50 (a bis d)



Legende:

- EG Gebiet
 - LV Gebiet
 - Stufe 0
 - Stufe 1
 - Stufe 2
 - Stufe 3
 - Stufe 4
 - Stufe 5
 - Stufe 6
- EG = Emschergenossenschaft Einzugsgebiet
 LV = Lippeverband Einzugsgebiet
 ● = 1 KFZ mit aktivem Scheibenwischer auf Wischstufe 0-6

- 100 dBZ
 80
 60
 40
 20
 0
- Signal aus DX-Radardaten → Standort-Reflektivitätsprodukt.
 Scan: Niederschlags-Scan
 Format: nullenkomprimiert
 Horizontale Auflösung: 1° x 1 km
 Horizontale Reichweite: 128 km
 Verfügbarkeit: 5 min
 Klassenzahl: 255
 Sonstige Informationen: äquidistant zwischen -32,5 dBZ und +92,5 dBZ

Abb. 5: PROSY – Produktives System zur Auswertung und Abbildung der mobileVIEW Datenkollektive (Quelle: IAV)

4. Zielsetzung und Verwertungsmöglichkeiten

Das Projekt mobile^{VIEW} hat zum Ziel, eine systematische Verdichtung von Echtzeit-Niederschlagsinformationen zu generieren, die in Ergänzung der bestehenden Erhebungen von Niederschlagsdaten einen Mehrwert für die Niederschlagsprognose im Kurzestfristbereich bietet. Die Übertragung, Vernetzung und Analyse der in der heutigen Fahrzeuggeneration ohnehin erhobenen Daten offeriert gegenüber den Stations- und Radarmessungen im Wesentlichen zwei Vorteile:

Die in Deutschland täglich bewegte Anzahl an Fahrzeugen stellt ein riesiges Potenzial an mobilen Niederschlagsmessungen dar und bietet somit die Möglichkeit einer hohen räumlichen Verdichtung gegenüber heutigen stationären Niederschlagsbeobachtungen. Für die hydrologische Modellierung sowie Nowcast-Anwendungen erweitern die im Rahmen des Forschungsprojektes gewonnenen Daten den Input um eine räumlich und zeitlich hoch aufgelöste weitere Quelle.

In der praktischen Umsetzung trägt mobile^{VIEW} dazu bei, das Systemverständnis und die Relevanz anderer im Verkehrsbereich erhobener Daten für die Wasserwirtschaft zu erhöhen. In der Bevölkerung soll das Bewusstsein für die Wertigkeit einer systematischen Erhebung und Auswertung von Fahrzeugdaten erzeugt werden, wobei die in mobile^{VIEW} erhobenen Daten, ihre Visualisierung und darauf beruhende Warnungen einen besonderen Beitrag leisten können, Gefährdungen, z.B. aus Starkregenereignissen, begegnen zu können. Administrative Einheiten, bspw. Wasserverbände, der Katastrophenschutz oder Verkehrsleitzentralen, gewinnen auf Basis der Mehrwerte aus mobile^{VIEW} Zeit zur Durchführung von individuellen Maßnahmen im Ereignisfall. Die Daten können weiterhin einen Beitrag zu wasserwirtschaftlichen Fragestellungen leisten, wie z. B. zur Steuerung von Kanalnetzen und Regenrückhalte-räumen. Unternehmen und Einzelpersonen profitieren dadurch, dass sie vor drohenden oder aktuellen Überschwemmungen gewarnt werden und sich auf die resultierenden Beeinträchtigungen vorbereiten können.

Literatur

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft (DWA) - Niederschlagserfassung durch Radar und Anwendung in der Wasserwirtschaft, 2017.

GDV, G. d. D. V. e. V., 2019. Naturgefahrenreport 2018 - Die Schaden-Chronik der deutschen Versicherer. Retrieved from <https://www.gdv.de/resource/blob/36254/23ad47bd6746bc456849b5cd41f61516/naturgefahrenreport-2018---schaden-chronik-data.pdf>

IPCC, 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Retrieved from Cambridge (UK), New York (USA).

Mohr, S., Kunz, M., Keuler, K., 2015. Development and application of a logistic model to estimate the past and future hail potential in Germany. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 120, 3939-3956.

- Pfister, A., Treis, A., Teichgräber, B., 2015. Der Einsatz von Radardaten für wasserwirtschaftliche Zwecke bei Emschergenossenschaft und Lippeverband. *Korrespondenz Wasserwirtschaft (KW)*, 2/2015, 115-124.
- Treis, A., Pfister, A., Falk, D., Kutschera, G., Braun, M., Pätsch, M., Eckardt, D., 2018. Improving the short-term forecast of precipitation events using vehicle sensor data - research project mobileVIEW.

Zusammenführung von Daten (Durchfluss, Wassertemperatur und Sauerstoffkonzentration) zu Überblicksdarstellungen für die Flussgebiete Rhein, Weser, Elbe, Oder und Donau

Daniel Schwandt, Gerd Hübner

Zusammenfassung

Die Informationsplattform Undine zeigt für die großen Flussgebiete in Deutschland Überblicksdarstellungen zum Durchfluss, zur Wassertemperatur und zur Sauerstoffkonzentration. Dafür werden Daten zahlreicher Institutionen automatisiert zusammengeführt und aufbereitet.

1. Einleitung

Die großen Flüsse in Deutschland und deren Hauptzuflüsse queren Ländergrenzen und werden im Rahmen der Zuständigkeiten von verschiedenen Behörden überwacht. Die gemessenen Daten werden meist in den jeweils historisch gewachsenen Informationssystemen der einzelnen Bundesländer dargestellt, bleiben dabei jedoch auf Teilbereiche der Flussgebiete beschränkt.

Basierend auf den mehrmals täglich bereitgestellten Daten der Länderbehörden, der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes sowie gegebenenfalls von Behörden der Nachbarstaaten werden auf der Informationsplattform Undine (<http://undine.bafg.de>) flussgebietsbezogene Überblicksdarstellungen für die Wasserführung, die Wassertemperatur und die Sauerstoffkonzentration zusammengestellt. Die Überblicksdarstellungen weisen die höchsten Zugriffszahlen aller Webseiten der Informationsplattform Undine auf.

Entwicklung und Pflege der Informationsplattform Undine erfolgen durch die Bundesanstalt für Gewässerkunde und werden vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit aus Mitteln des „Messprogramms zur Überwachung der Gewässergüte grenzüberschreitender Flüsse sowie von Küstengewässern“ gefördert.

2. Überblicksdarstellungen

Aktuelle Messwerte ausgewählter repräsentativer Messstellen werden einheitlich für alle Flussgebiete mit einer meist siebenstufigen Klassifizierung eingeordnet und visualisiert. Abbildung 1 zeigt Beispiele zum Elbegebiet. In einem Tooltip-Fenster können für jeden Messpunkt Details zur aktuellen Messung abgerufen werden. Zu fast allen Messstellen bietet die Informationsplattform Undine auch Einzeldarstellungen mit Stammdaten und Zeitreihengrafiken der Messgrößen über die letzten 31 Tage. Für weitere Messstelleninformationen und die Möglichkeit zum Herunterladen / Anfragen von Daten wird auf die Seiten der Messstellenbetreiber verwiesen. Die Messstellenauswahl fokussiert auf den Hauptstrom und die Unterläufe seiner wichtigsten Zuflüsse. Die Überblicksdarstellung zeigt bei sehr großen internationalen Einzugsgebieten (Rhein, Donau, Elbe) vorrangig den in Deutschland befindlichen Gebietsanteil, ansonsten das gesamte Einzugsgebiet.

Mit der Einbettung in eine Informationsplattform werden zahlreiche weiterführende Informationen unmittelbar aufbereitet oder über thematische Linksammlungen angeboten.

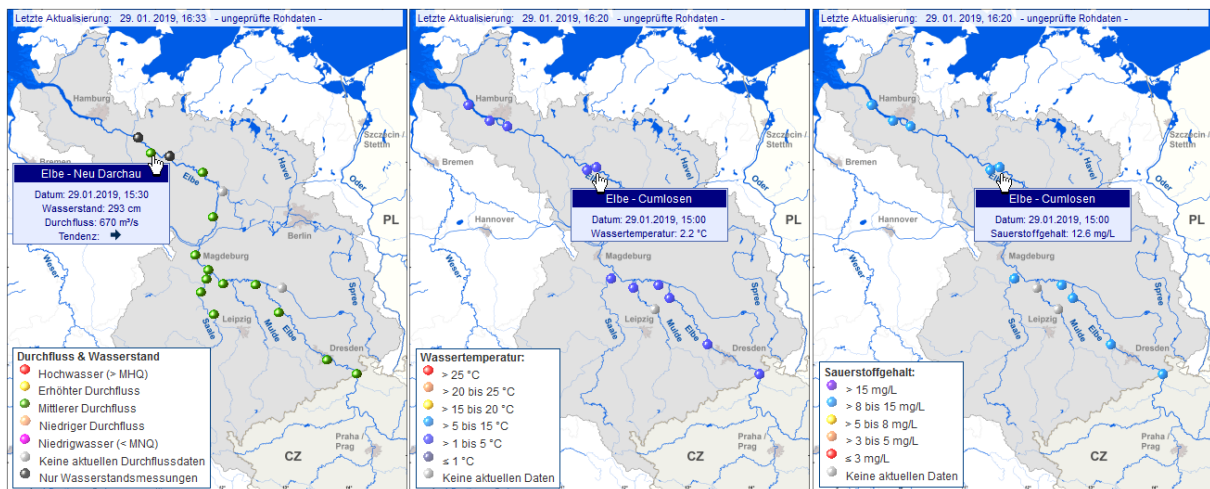


Abb. 1: Überblickskarten zur Wasserführung, Wassertemperatur und Sauerstoffkonzentration an Messstellen im Elbegebiet.

3. Zusammenführung und Aufbereitung der Daten

Die Bereitstellung von Daten durch die Länderbehörden erfolgt auf unterschiedlichen Wegen. Meist gibt es eine passwortgeschützte Freigabe für ausgewählte Messstellen zum Herunterladen der Messwerte oder die zuständige Behörde stellt für eine abgestimmte Auswahl an Messstellen und Kenngrößen in bestimmten Zeitintervallen Datensätze bereit. Einige Behörden verfügen auch über ein großes öffentlich zugängliches Datenangebot, aus dem die betreffenden Datenreihen abgerufen werden. Die Datenübertragung erfolgt automatisiert mehrmals täglich.

Die verwendeten Datenformate und -übertragungsvarianten sind bei der Vielzahl der datenbereitstellenden Behörden sehr heterogen. Aus den diversen Eingangsdatenformaten werden die gewünschten Daten extrahiert, geprüft (Behandlung fehlender / veralteter Daten) und in ein einheitliches Ausgangsdatenformat transformiert. Für die Undine-Überblickskarten werden die aktuellen Messwerte der Messstationen einheitlich klassifiziert (Abb. 1).

Die Klassifikation der Durchflüsse an den Pegeln orientiert sich an den gewässerkundlichen Hauptwerten MNQ, MQ und MHQ. Bei den Klassifikationen werden folgende Gewässerzustände besonders hervorgehoben:

- Hochwasser und Niedrigwasser
- fischkritische Sauerstoffkonzentrationen (< 3 mg/L),
- Wassertemperaturen oberhalb des Schwellenwerts von 25 °C (bei längerer Überschreitung können sich ökologisch kritische Zustände einstellen),
- Wassertemperaturen unterhalb von 1 °C (Gefahr der Eisbildung).

Parallel dazu erfolgt die Erzeugung von Grafiken zur Zeitreihendarstellung. Die Klassifikationsdateien und die Grafiken werden auf den Webserver übertragen und bewirken eine Aktualisierung der Übersichts- und Einzeldarstellungen auf der Informationsplattform Undine. Die Darstellungen zur Wasserführung werden stündlich, die zur Wassertemperatur / Sauerstoffkonzentration dreistündlich aktualisiert.

Alle Arbeitsschritte laufen vollautomatisiert ab. Anpassungen müssen bei der Aufnahme neuer Messstellen und Kenngrößen sowie – nicht selten – bei geänderten Datenformaten und Übertragungswegen vorgenommen werden.

4. Ausblick

Die Informationsplattform Undine wird dynamisch weiterentwickelt. In Kürze erfolgt dort auch die Darstellung des Flussgebiets der Ems. Für weitere Überblicksdarstellungen zur Wasserbeschaffenheit kämen in erster Linie die kontinuierlich gemessenen Kenngrößen pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit und Trübung in Frage. Weiterhin sind flussgebietsübergreifende Darstellungen möglich. Für die internationale Sichtbarkeit und erleichterte Nutzung der Informationsplattform in den Nachbarländern befindet sich eine englischsprachige Version in der Entwicklung.

Weiterführende Literatur

- Schwandt, D., Hübner, G., 2012. Hoch- und Niedrigwasser im Fokus – die Informationsplattform „Undine“. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 56/2, 87-89.
- Schwandt, D., Hübner, G., 2015. Die Informationsplattform „Undine“, in: Kofalk, S., Scholten, M., Faulhaber, P., Baufeld, R., Kleinwächter, M., Kühlborn, J. (Hrsg.), *Struktur und Dynamik der Elbe. Konzepte für die nachhaltige Entwicklung einer Flusslandschaft 2/3*. Weißensee Verlag, 398-400.

Hydrographische Daten für alle – Messen und Publizieren in Österreich seit 125 Jahren

Jutta Eybl, Reinhold Godina, Gabriele Müller

Zusammenfassung

Vor 125 Jahren begann der Hydrographische Dienst in Österreich mit der organisierten Messung von Pegelständen, Niederschlag und Schneehöhen und der Publikation der erhobenen Werte im Hydrographischen Jahrbuch. Seither wurden das Messnetz stetig erweitert und die Messmethoden laufend modernisiert. Schon früh nutzte man die Möglichkeiten der elektronischen Datenverarbeitung zur Speicherung und Veröffentlichung der Messwerte. Das Hydrographische Jahrbuch erscheint noch immer, wird aber mittlerweile durch die Web-GIS-Applikation eHYD (elektronische hydrographische Daten) ergänzt, die hydrographische Daten auch zum kostenlosen Download anbietet.

1. Das Messnetz der Hydrographie Österreichs

Den Wasserkreislauf in Österreich durch Messen zu erfassen, die Informationen zu managen und für die Wasserwirtschaft, die Wissenschaft, die politischen Entscheidungsträger und die interessierte Öffentlichkeit verfügbar zu machen, ist der im Wasserrechtsgesetz definierte Auftrag des Hydrographischen Dienstes. Seit seiner Gründung vor 125 Jahren stützt er sich dabei auf folgende drei Säulen:

- das Hydrographische Zentralbüro – heute Abteilung Wasserhaushalt im Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (BMNT) –, verantwortlich für die Planung des Messnetzes, die Koordination der Datenerfassung, die Qualitätskontrolle sowie die Analyse und Veröffentlichung der hydrologischen Informationen,
- die Hydrographischen Dienststellen in den Ländern, zuständig für operative Aufgaben an den Messstellen, die Datensammlung, Hochwasserprognose und Betreuung der
- externen Beobachterinnen und Beobachter, die an den Messstellen die Werte erheben.

Das staatliche vom Hydrographischen Dienst betreute Messnetz umfasst heute ca. 6500 gewässerkundliche Einrichtungen der Sachgebiete Niederschlag, Lufttemperatur, Verdunstung, Oberflächengewässer, Schwebstoffe, Grundwasser, Quellen und Ungesättigte Zone, die über ganz Österreich – von den ebenen Beckenlandschaften über die Hügel des Alpenvorlands bis zu hochgelegenen Alpenregionen – verteilt sind. Es gibt in Siedlungen ebenso Messstellen wie in landwirtschaftlich genutzten Bereichen oder Naturschutzgebieten. Der Weg zu den Messstellen ist oft weit und besonders im Winter auch beschwerlich. All diese Messstellen möglichst ausfallsfrei zu betreiben ist eine ständige große Herausforderung und ohne entsprechenden Personaleinsatz nicht machbar.

In der langen Geschichte mussten die gewässerkundlichen Einrichtungen an den sich immer schneller wandelnden technischen Standard der Mess-, Speicher- und Übertragungstechnik angepasst werden. Die Errichtung der Messstellen und die Durchführung der Messungen erfolgen seit jeher einheitlich nach den Richtlinien des Hydrographischen Dienstes.

Derzeit betreibt der Hydrographische Dienst in Österreich rund 1200 Regenmesser (Ombrometer oder Waagen), 800 Stationen zur Schneehöhenmessung, 765 Lufttemperaturmessstellen und 36 Verdunstungsmessstellen. Ca. 600 Niederschlagsmessstationen sind mit einem Datensammler und davon der Großteil auch mit Datenfernübertragung ausgestattet. Im

Bereich Oberflächengewässer wird an nahezu allen ca. 760 Messstellen, gelegen an Bächen, Flüssen und Seen, der Wasserstand mit einem Datenlogger aufgezeichnet und immer häufiger auch fernübertragen. Die für die Hochwasserprognose wichtigen Pegel verfügen über eine redundante Messausstattung. Die Wassertemperatur wird an 290 Messstellen erfasst. Bei rund 620 Messstellen an fließenden Gewässern wird der Abfluss ermittelt. 2002 wurde auch mit der Messung von Schwebstoffen in Fließgewässern begonnen, mittlerweile gibt es 34 solcher Stationen.

Während Regen, Schneehöhen und Pegelstände schon im 19. Jahrhundert an vielen Stellen gemessen wurden, begann die großflächige Grundwasserbeobachtung erst in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts. Mittlerweile existieren ca. 3400 Grundwassermessstellen, Bohrlöcher und Brunnen, die in den Becken und Tälern mit Porengrundwasservorkommen konzentriert sind. Etwa 2100 davon sind mit Datensammlern ausgerüstet und 550 werden per Funk oder Modem fernübertragen. Die Grundwassertemperatur wird an rund 2030 Messstellen gemessen. Seit 1995 werden an Quellen Schüttung, Leitfähigkeit und Wassertemperatur, in ausgewählten Fällen auch Trübung mit Hilfe von Datenloggern aufgezeichnet. Mittlerweile bestehen 88 solcher Quellmessstationen, von denen viele mit Fernübertragung ausgestattet sind. An zehn Standorten wird versucht den vertikalen Wassertransport in der ungesättigten Bodenzone zu verfolgen und Erkenntnisse über die Grundwasserneubildung zu gewinnen. Private Beobachterinnen und Beobachter unterstützen die hydrographische Arbeit, indem sie Messstellen regelmäßig besuchen, Messungen und Kontrollen durchführen und die Werte an den Hydrographischen Dienst senden.

2. Die Pflege großer Datenmengen - HyDaMS

Bei der großen Anzahl an Messstellen ist ein einheitlicher klar definierter Datenfluss von der Messung, über die Speicherung und die Qualitätskontrolle bis zur Veröffentlichung notwendig.

Die immer höher werdenden Ansprüche an das Datenmanagement veranlassten das Hydrographische Zentralbüro bereits 1966, sukzessive die automationsgestützte Datenverarbeitung – wie damals üblich auf einer Großrechenanlage – einzuführen und etwas später wurde mit der Digitalisierung von Schreibstreifen analoger kontinuierlich registrierender Geräte begonnen. Mit dem Einsatz von digitalen Datenloggern ab Ende der 1980er Jahre stieg die zu bearbeitende Datenmenge rapide und damit auch die Anforderung an die Datenbearbeitung. Anfang 1995 erhielt die Firma aquaplan – nunmehr toposoft – in Aachen den Auftrag zur Entwicklung des Hydrographischen Datenmanagementsystems genannt HyDaMS, das bis heute das zentrale Werkzeug des Hydrographischen Dienstes ist. Regelmäßig wird es an die Anforderungen neuer Betriebssysteme, sich verändernder Hardware und Messtechniken angepasst sowie um zusätzliche Module zur Bearbeitung und Auswertung erweitert.

HyDaMS ist auf dem Computer jedes Mitarbeiters des Hydrographischen Dienstes installiert. Es ermöglicht den schnellen Datenzugriff über eine einfache Benutzeroberfläche, bietet viele hydrologisch relevante Funktionalitäten zu Zeitreihen und praktische Visualisierungstools. Das Datenmodell umfasst im Wesentlichen die Stammdaten der Messstellen und Zeitreihen, wobei die Stammdaten in einer relationalen Datenbank und die zeitbezogenen Massendaten in Binärdateien gespeichert sind. Es ist möglich, Ganglinien für jeden Parameter zu visuali-

sieren und Zeitreihen verschiedener Messstellen zu vergleichen. Das erleichtert auch die Analyse wasserbedingter Naturereignisse enorm.

Die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter in den Hydrographischen Landesdiensten sind verantwortlich für die Messstellenstammdaten und sorgen dafür, dass die Zeitreihendaten erfasst werden. Von Beobachtern gemessene Einzel- und Kontrollwerte werden händisch in HyDaMS eingegeben. Datenlogger werden zwei- bis viermal im Jahr ausgelesen und die Daten danach in HyDaMS importiert. Von immer mehr Messstellen gelangen die Daten mittels Fernübertragung direkt in die HyDaMS-Datenbank. Im Anschluss an den Datenimport, müssen die Daten geprüft, Fehler korrigiert und Lücken geschlossen werden.

Es wird im Wesentlichen eine standardisierte visuelle Plausibilitätsprüfung durch Vergleiche mit Kontrollwerten, benachbarten Messstellen, üblichen Verläufen und anderen Parametern durchgeführt. Für die Berechnung kontinuierlicher Durchflusszeitreihen werden teilautomatisierte Standardmodule verwendet, mit deren Hilfe die Wasserstand-Durchflussbeziehungen und der Zeitraum für den sie Gültigkeit haben, festgelegt werden. Die so erstellten Durchflusszeitreihen werden mit einer Bilanzierungsmethode, bei der die Durchflüsse jeder Messstelle mit den Ergebnissen der Oberliegermessstellen in Beziehung gesetzt werden, geprüft.

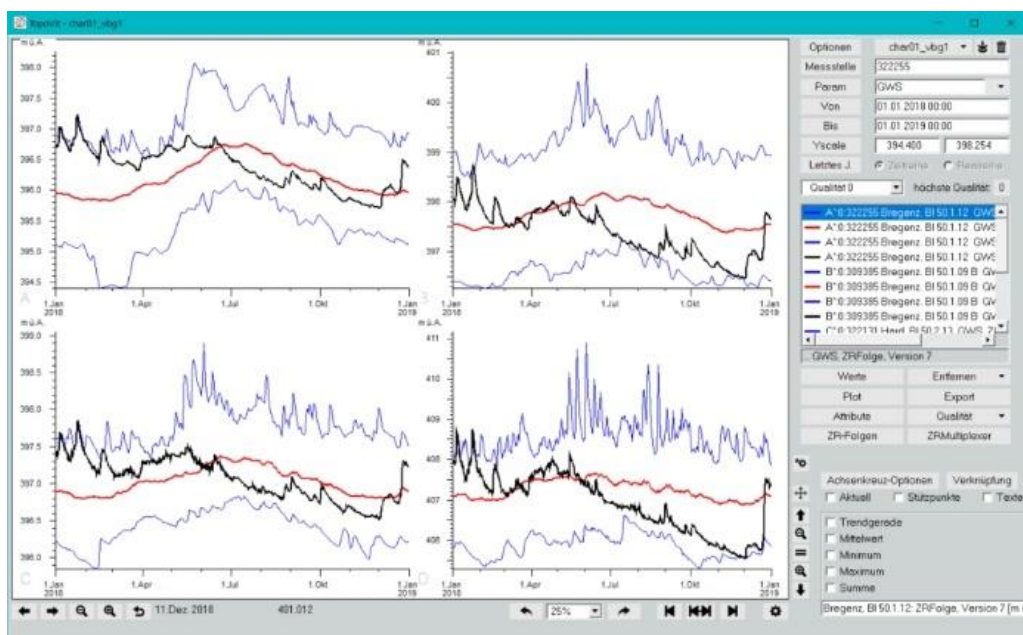


Abb. 1: Vergleich von vier ähnlichen Grundwasserganglinien 2018 mit deren Tagesmitteln sowie Tagesminima und Tagesmaxima seit Beobachtungsbeginn in HyDaMS

Ist die Datenprüfung und -bearbeitung in der Landesdienststelle abgeschlossen, werden Stammdaten und Zeitreihen an das Hydrographische Zentralbüro übermittelt, wo die Daten nochmals geprüft und für die Veröffentlichung vorbereitet werden.

Obwohl HyDaMS für Datenprüfung und -korrektur viele Programmmodule enthält, hat sich die Bearbeitungszeit für die Veröffentlichung qualitativ hochwertiger Daten aufgrund der immer größer werdenden Datenmenge gegenüber dem analogen Zeitalter nur wenig reduziert.

3. Das Hydrographische Jahrbuch

Die Geschichte des Hydrographischen Dienstes in Österreich spiegelt sich auch in der Geschichte seiner wichtigsten Publikation, dem Hydrographischen Jahrbuch von Österreich. 1895 erschien die erste Ausgabe mit den Werten von 1893 der bei der Gründung übernommenen Messstellen im österreichischen Teil der Monarchie, die noch von den vorigen Betreibern erhoben worden waren. Erst ab dem Jahrbuch 1895 waren es Daten die von Beobachterinnen und Beobachtern des Hydrographischen Dienstes erfasst wurden. Nach 14 Hauptflussgebieten geordnet wurden Niederschlagshöhen, Schneehöhen, Lufttemperaturen, Wasserstände und Wassertemperaturen veröffentlicht. Weiters enthielt das Jahrbuch eine Beschreibung der hydrologischen Verhältnisse des Jahres, Graphiken und eine Karte der Niederschlagshöhen sowie Hinweise auf Messstellen im ausländischen Teil eines Flussgebiets. Bis zum Jahrbuch 1913 erschien es in 15 Einzelheften, die zu ein oder zwei Bänden gebunden wurden, danach ab dem Jahrbuch 1914, das 1919 herausgegeben wurde, waren nur mehr die Messstellen des heutigen Bundesgebiets enthalten und es reichten 4 bzw. 5 Hefte.

In der politisch wie wirtschaftlich unruhigen Zeit der ersten Republik war die Herausgabe eines so großen Druckwerks mit erheblichen Problemen verbunden, weshalb nur wenige Jahrbücher erschienen. Nachdem der Hydrographische Dienst 1945 wieder in seiner ursprünglichen Form organisiert worden war, hat man zunächst die Rückstände in der Jahrbuchveröffentlichung aufgearbeitet und für die Jahre 1934 bis 1947 verkürzte Jahresübersichten herausgegeben.

Das Jahrbuch 1948 enthielt dann wieder alle früher üblichen Tabellen und erstmals auch Angaben zu Abflüssen. Ab dem Jahrbuch 1950 wurden große herausnehmbare Österreichkarten, auf denen die Messstellen des Hydrographischen Dienstes verzeichnet waren, eingelegt. Die im Jahrbuch 1968 veröffentlichten Grundwasserauswertungen wurden erstmals mit elektronisch erfassten Daten erstellt. Alle Auswertungen des Jahrbuches 1976 basierten dann zur Gänze auf Daten, die in einer Großrechenanlage gespeichert waren. Das Jahrbuch 1997 schließlich war das erste, das mit Hilfe von HyDaMS erstellt wurde. Den Jahrbüchern 2003 bis 2010 war eine CD mit Tabellen und Auswertungen im PDF-Format beigelegt, die auch auf der Webpage des Ministeriums zum Download angeboten wurden.

Aufgrund der zunehmenden Messstellen- und Parameteranzahl hat sich der Umfang des Jahrbuches ständig vergrößert. Das letzte mit Daten und Auswertungen gedruckte Jahrbuch war jenes von 2012 mit einem Umfang von 1000 Seiten und mehr als einer Million Kennwerte. Diese Form der Veröffentlichung war nicht mehr zeitgemäß und so ist seit 2013 das gedruckte Jahrbuch eine detaillierte hydrologische Jahresbeschreibung der Wasserbilanzkenngrößen Niederschlag, Abfluss und Grundwasser, während die hydrographischen Daten und Auswertungen über eine eigens dafür entwickelte Internetapplikation (<https://wasser.umweltbundesamt.at/hydjb>) veröffentlicht werden.

4. eHYD-die Internetplattform des Hydrographischen Dienstes in Österreich

Um allen Interessierten einen raschen kostenfreien Zugang zu hydrographischen Daten zu ermöglichen, wurde die GIS-basierte Internetplattform eHYD (<http://ehyd.gv.at>) entwickelt, die 2005 online ging. Das Angebot wurde seitdem ständig erweitert und reicht heute von

vieljährigen Zeitreihen unterschiedlicher Parameter des Datenarchives über ungeprüfte, aktuelle Onlinedaten bis hin zu Auswertungen des Gebiets- und Bemessungsniederschlags in Österreich, sowie Informationen über in Österreich durchgeführte Markierungsversuche. Die im CSV-Format zum Download angebotenen geprüften Archivdaten reichen jeweils vom Beginn der elektronischen Verfügbarkeit bis zum aktuellsten Hydrographischen Jahrbuch.

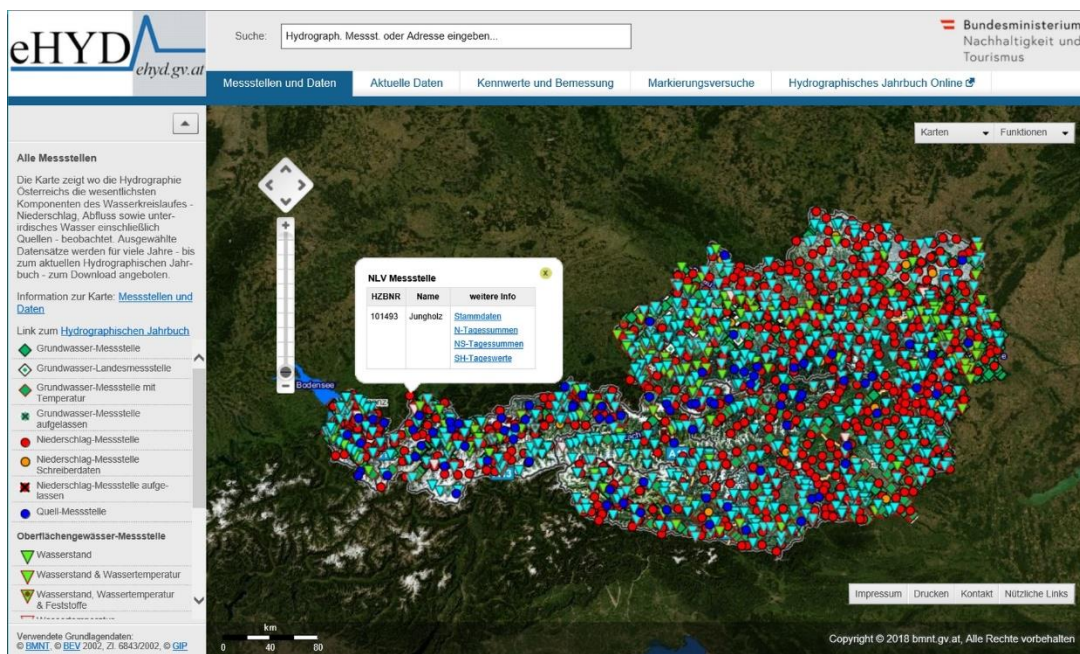


Abb. 2: Auf eHYD – Messstellen und Daten werden alle im Hydrographischen Jahrbuch enthaltenen Messstellen dargestellt. Mit Klick auf ein Messstellensymbol öffnet sich ein Tooltip mit Links für den Download der an dieser Messstelle zur Verfügung stehenden Daten.

Um auf den Karten „Pegel -, Niederschlag - und Grundwasser aktuell“ einen raschen Überblick über die bestehende Situation zu ermöglichen, zeigen die Farben der Messstellensymbole den aktuellen Status wie niedrig, mittel oder hoch an. Für Abflussmessstellen gibt es zudem noch verschiedene Formen von Symbolen, die die Tendenzen bei hohen Durchflüssen und Hochwasser zeigen. Aktuelle Informationen, z.B. Hochwasserwarnungen, werden im Anlassfall am oberen Rand der Web-Seite hinzugefügt.

In einer weiteren Karte werden Einspeisungs- und Beobachtungsstellen von Markierungsversuchen aus der BMNT-Markierungsversuchedatenbank dargestellt, um deren Ergebnisse für wasserwirtschaftliche Planungen zugänglich zu machen. Die nachgewiesenen unterirdischen Fließverbindungen werden ab einem Darstellungsmaßstab größer 1:50.000 in Form von Pfeilen eingeblendet. Für jeden gespeicherten Markierungsversuch steht eine kurze Zusammenfassung und teilweise auch Bildmaterial zum Download zur Verfügung.

Für alle Darstellungen in eHYD kann eine aus drei Grundkarten (Luftbild, topographische Karte oder Reliefkarte) gewählt werden. Außerdem besteht die Möglichkeit administrative Grenzen, Verkehrswege und das Gewässernetz optional zuzuschalten und eine zusätzliche Karte, wählbar aus einer Liste, einzublenden z. B. Grundwasserkörper oder Einzugsgebiete. Die stetig steigenden Zugriffe auf eHYD beliefen sich 2018 auf ca. 150.000 Anwendungsauf-rufe mit mehr als 2,5 Millionen weiteren Kartenaufrufen. Es ist die weitaus am häufigsten

besuchte GIS-Anwendung des BMNT. Die Datenanfragen im Ministerium oder bei den Hydrographischen Landesdienststellen sind seit der Einführung von eHYD merkbar gesunken.

Literatur

Godina, R., 2019. Kontinuität und Wandel: Die Hydrographie Österreichs – 125 Jahre Wasser-Wissen schaffen. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 71, 1-2, 18-29.

HydroNET-SCOUT – Ein Webportal zum Zugriff auf qualitätsgeprüfte Niederschlagsdaten

Alexander Strehz, Thomas Einfalt, Marcel Alderlieste

Zusammenfassung

Mit Hilfe des Webportals HydroNET-SCOUT kann bequem und mit ausgefeilten Funktionalitäten einfach sowohl auf online-Radardaten als auch auf Radardatenkataloge (Ereignisdatenbanken aus Reanalysen der Radar- und Stationsdaten) zugegriffen werden. Die verschiedenen, erzielbaren Datenqualitäten werden erläutert und eine grobe Übersicht über Funktionen des Webportals gegeben.

1. Einleitung

Verlässliche Niederschlagsinformationen werden für zahlreiche hydrologische Anwendungen benötigt. Die Herausforderung besteht darin, diese Informationen aus den zahlreich vorhandenen Daten zu gewinnen und bereitzustellen. Häufige Anforderungen an die Daten sind hierbei eine hohe zeitliche und räumliche Auflösung, eine gute räumliche Abdeckung, eine hohe Genauigkeit und eine schnelle Bereitstellung. Ausgehend von diesen Überlegungen wurde ein Webportal mit Zugriff auf qualitätsgeprüfte Radardaten entwickelt. Die Daten werden in der Datenbank an einem zentralen Ort vorgehalten und sind durch das Webportal von überall aus problemlos und durch die spezielle Implementierung schnell verfügbar. Die Qualitätskontrolle stellt sicher, dass die Daten den Ansprüchen verschiedener Anwendungen genügen. Hierbei wird zwischen zeitkritischen Anwendungen und jenen, die umfangreiche Daten höchster Qualität benötigen, unterschieden. Hierfür werden Beispiele in Abschnitt 3 und 4 vorgestellt.

2. Datenhaltung in HydroNET

Die Datenhaltung in HydroNET ermöglicht einen schnellen Zugriff sowohl in der Zeit (Zeitreihen) als auch im Raum (Rasterdaten und Bilder) durch eine geschickte Indizierung und – bei der Ereignisdatenbank – Vorverarbeitung der definierten Ereignisse. Dadurch werden die Daten nicht unnötig vervielfältigt und stehen über das Webportal schnell zur Verfügung.

Im Einzelnen werden Radardaten als ODIM-HDF5-Format importiert und intern als netCDF-Format gehalten. Die Daten werden als kumulative Millimeter verwaltet, was für die Darstellung von Teilsummen zu enorm schnellen Berechnungszeiten führt.

Für die Ereignisdatenbank wurden zusätzlich Zwischenauswertungen in einer MySQL-Datenbank abgelegt, so dass zu jedem Pixel die Auswertungen direkt abrufbar sind und für das HydroNET-Portal bereitgestellt werden können.

3. Niederschlagsdaten – für zeitkritische Anwendungen und tägliche Berichte

3.1. Unterschiedliche Qualität und Bereitstellungszeit

Für zeitkritische Anwendungen und tägliche Berichte müssen die Daten in einem Zeitraum von wenigen Minuten bis einigen Stunden zur Verfügung stehen. Trotz dieser Anforderungen an die Datenverfügbarkeit spielt auch in diesen Anwendungen die Datenqualität eine entscheidende Rolle. Um diesen Anforderungen Rechnung zu tragen, werden verschiedene

Daten mit SCOUT zu einem neuen Niederschlagsdatensatz verarbeitet. Die Datenbearbeitung erfolgt voll automatisiert was eine schnelle und kontinuierliche Bereitstellung der Daten gewährleistet.

Die Datengrundlage bilden die frei verfügbaren Radardaten und Stationsdaten des Deutschen Wetterdienstes (<https://opendata.dwd.de>).

Hierbei liefern Radarmessungen die gewünschten räumlichen Informationen und eine hohe zeitliche Auflösung, während durch die Aneichung dieser Daten mit Stationsmessungen deren Genauigkeit erhöht wird. Insbesondere für die Radardaten ist eine vorhergehende Qualitätskontrolle und Korrektur notwendig. Hierfür sind in SCOUT zahlreiche Funktionen implementiert. Unterschiedliche Anwendungen haben unterschiedliche Ansprüche in Bezug auf die benötigte Datenbereitstellungszeit und Datenqualität. Es hat sich daher als ideal erwiesen, die Datenaufbereitung mit einer gewissen Verzögerung zu wiederholen. Diese nachgerechneten Daten weisen in der Regel eine höhere Qualität auf als die in nahezu Echtzeit zur Verfügung gestellten Daten. Dies liegt daran, dass zum einen die Datenverfügbarkeit mit der Zeit seit der Messung steigt und zum anderen unterschiedliche Aneichverfahren genutzt werden können. Eine Variante, die für das Land Schleswig-Holstein eingerichtet ist wird im Folgenden vorgestellt.

In der Variante der Aneichung mit der kürzesten Bereitstellungszeit werden alle Daten genutzt, die ca. 2 Minuten nach der letzten Radarmessung zur Verfügung stehen. Alle 5 Minuten wird ein Aneichfaktor am Standort jeder Niederschlagsstation berechnet, an dem sowohl die Station als auch das Radar ausreichend Niederschlag gemessen haben. Für die Berechnung des Aneichfaktors werden die Summen aus den Niederschlagsdaten der vergangenen drei Stunden beider Messverfahren verglichen, in SCOUT die erzielten Aneichfaktoren in die Fläche interpoliert und hiermit die Radardaten an die Stationswerte angepasst. Diese Qualitätsstufe (Stufe 1) steht ca. 5 Minuten nach der Messung zur Verfügung (Abb. 1).

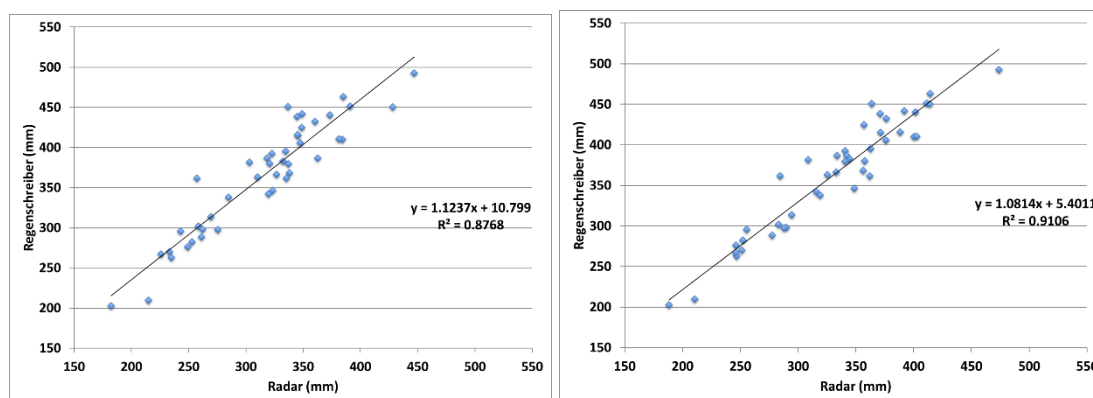


Abb. 1 Scatterplot der Gesamtsumme der Niederschlagsstationen und aus Radar (Stufen 1 und 2)

Einmal pro Stunde, mit einem zeitlichen Abstand von zwei Stunden zur letzten Radarmessung, werden die Radardaten dieses Zeitraums erneut mit Stationsdaten angeeicht. Zu diesem Zeitpunkt kann mit einer anderen Bestimmung der Aneichfaktoren die Radarmessung besser an die Stationsdaten angepasst werden. Jetzt werden die Aneichfaktoren für einen Dreistundenzeitraum bestimmt, der dem anzueichenden Zeitraum entspricht (Stufe 2).

Dadurch werden die Radardaten über denselben Zeitraum angeeicht, über den die Faktoren bestimmt wurden (Abb. 1).

Eine dritte Aneichung der Radardaten (Stufe 3) erfolgt einmal am Tag mit einer Verzögerung von 24 Stunden. Dies erhöht die Datenverfügbarkeit der Niederschlagsstationsdaten. Weiteren Einfluss auf die Genauigkeit der angeeichten Radardaten hat die Verwendung von Tagessummen bei der Bestimmung der Aneichfaktoren an den Niederschlagsstationen (Abb. 2).

Eine Auswertung der Tageswerte ist in Abb. 3 dargestellt. Dabei ist Stufe 0 die Ausgangsqualität von nicht angeeichten Radardaten.

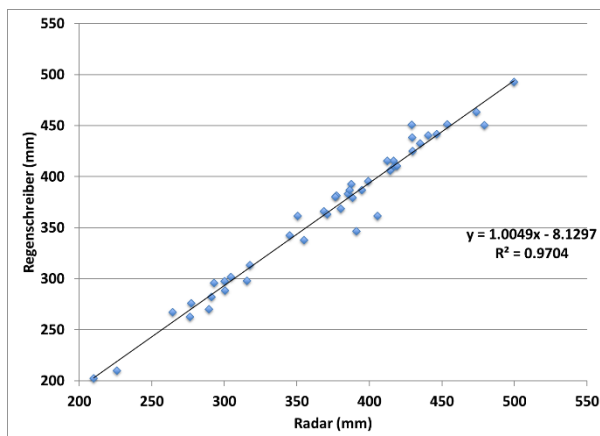


Abb. 2 Scatterplot der Gesamtsumme der Niederschlagsstationen und aus Radar (Stufe 3)

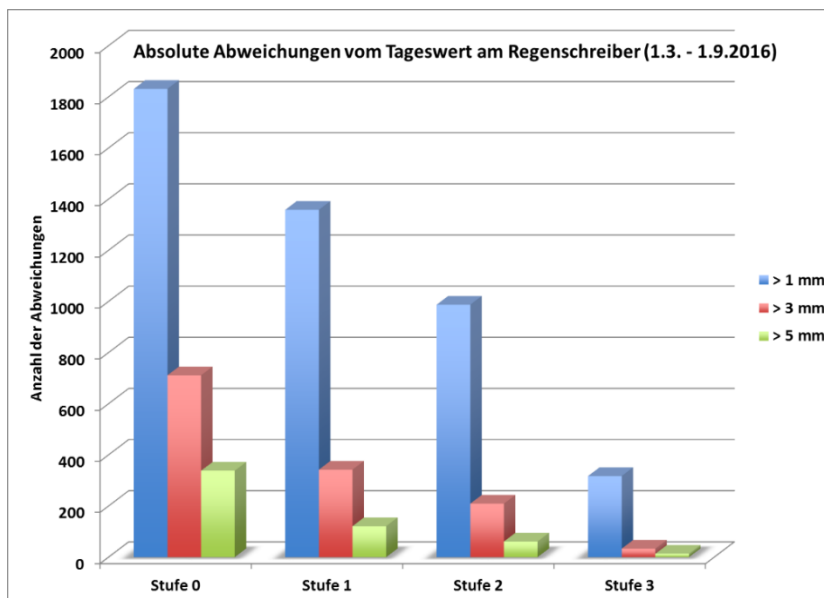


Abb. 3 Auswertung der Abweichungen von der Tagessumme der betrachteten Verfahren

3.2 Datennutzung mit HydroNET

Die einfache Bereitstellung dieser Daten erfolgt über HydroNET, ein Webportal mit Datenbankzugriff. Über das Webportal können unter anderem Einzelbilder und Summenbilder sowie Zeitreihen des Niederschlags dargestellt und heruntergeladen werden. Für die Bereitstel-

lung von Echtzeitinformationen und die Dokumentation abgelaufener Ereignisse steht die Anwendung „Niederschlagsradar“ zur Verfügung. Darüber hinaus können verschiedene Grafiken zu eigenen Übersichten zusammengefügt werden. Diese Übersichten liefern dann einen Überblick über die aktuelle Situation und können auch vom Smartphone aus betrachtet werden. Für die Berichterstellung besonders nützlich ist die Verwendung von „embedded links“. Damit können Grafiken in Formatvorlagen, Worddokumente oder auch Webseiten eingefügt werden, die dann immer die aktuellen Daten zeigen.

Berechnete Daten können geprüft werden, ob sie vorgegebene Grenzen in der Wiederkehrt häufigkeit im Vergleich mit KOSTRA 2010R überschreiten. Es werden dann die jeweils betroffenen Pixel in einer Liste zusammengestellt, so dass die Werte im Portal auch räumlich weiter analysiert und in ihrem Verlauf dargestellt werden können.

Alle Daten stehen auf der Basis von Pixeln (1 km x 1 km-Raster) oder von Einzugsgebieten, die vorher festgelegt wurden, als Zeitreihen zur Verfügung (siehe Abb. 4).

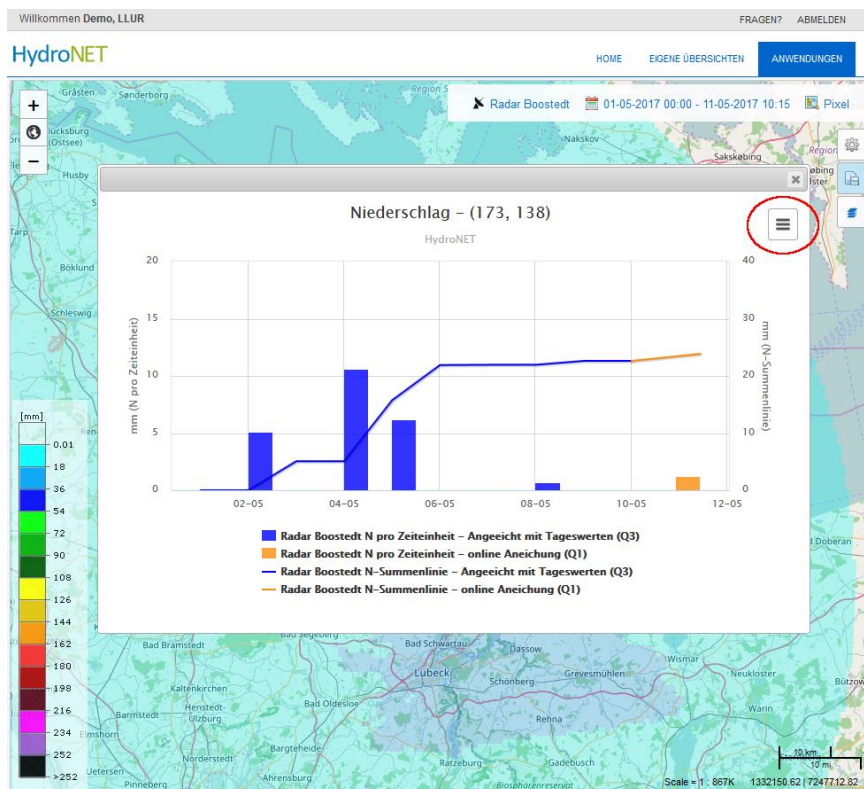


Abb. 4 Darstellung in HydroNET: Karte (1 x 1 km) und Zeitreihengrafik (14-Tagessumme)

4. Ereignisdatenbank – für umfangreiche Datensätze höchster Qualität

4.1 Idee

Für die Nutzung von Niederschlagsdaten im Bereich Planung und Vorsorge wurde die „Ereignisdatenbank“ entwickelt. Insbesondere die Aspekte Risikomanagement, Extremwerte und eine vereinfachte Datenbereitstellung können dadurch besser bearbeitet werden.

Für die Auswertungen werden aus den Radardaten Zeitreihen so hergeleitet, dass eine Auswahl bezüglich Niederschlagsschwelle pro Zeiteinheit und räumlicher Ausdehnung (Grö-

ße der Pixelgruppe) getroffen werden kann. Es werden jeweils Auswahlsschritte vorbereitet (z.B. Daten bezüglich 1 km², 9 km², 25 km², 81 oder 121 km², jeweils quadratisch).

Für eine einfache und gezielte Verwendung der umfangreichen Datenmengen wurden eine genaue Definition von „Ereignis“ getroffen und es spezielle Suchverfahren eingerichtet.

Ereignisse werden auf Basis von Schwellwerten pro Zeiteinheit identifiziert und über Trennkriterien zeitlich getrennt. Ein sinnvolles Trennkriterien ist eine Niederschlagspause, festgelegt mit weniger als 0.1 mm/h Niederschlag über ein Minimum aus (4 x Dauerstufe, 6 Stunden).

Gleichzeitige Ereignisse benachbarter Pixel werden zusammengefasst. „Gleichzeitig“ bedeutet dabei, dass sich die Dauerstufen überlappen – oder bei sehr kurzen Dauerstufen – der zeitliche Abstand nicht mehr als 20 Minuten beträgt. In einem solchen Fall ist dann das jeweils größere Ereignis (Maximum) maßgebend – das andere bleibt unberücksichtigt.

Ereignisse werden dann räumlich getrennt, wenn sie mehr als 1 km entfernt voneinander sind. Diese Festlegung ist etwas willkürlich, vereinfacht aber die Zusammenfassung.

Es gibt über das HydroNET-Portal zahlreiche Abfragemöglichkeiten (Auswahl Dauerstufen, Suchraum, zeitliche Eingrenzung, u.a.m.) und Darstellungsoptionen (Zeitreihe, Rasterbild, Tabelle, etc.).

4.2 Ereignisdatenbank NRW

Eine Nachsimulation der bestehenden Datenbasis der wasserwirtschaftlichen Jahre 2001 bis 2017 wurde durchgeführt, wobei

- Korrekturen für Clutter, Speckle, Strahlblockierung, Einzelstrahlen (Interferenzen), Dämpfung für die Daten der Radarstandorte Essen, Neuheilenbach, Flechtdorf und Hannover durchgeführt wurden
- die Kompositierung auf Basis der korrigierten Einzelradardaten erfolgte
- ein Aneichverfahren mit (zeitlicher) Bildinterpolation eingesetzt wird und
- über 900 Regenschreiber seit 2001 für die Aneichung berücksichtigt werden.

Diese hochwertigen Daten stehen dem Land NRW und den beteiligten Wasserverbänden zur Verfügung.

4.3 Ereignisdatenbank Deutschland

Auf Basis der Nachberechnung der Radolandaten im Rahmen der Radarklimatologie des Deutschen Wetterdienstes wurde ebenfalls ein Kontinuum an angeeichten Radardaten, auf Basis der Niederschlagsstationen des DWD für ganz Deutschland erstellt. Diese Daten liegen im Open-Data-Portal des DWD vor und wurden in eine Ereignisdatenbank in HydroNET überführt. Damit steht diese Datenbasis ebenfalls für umfangreiche und einfach zu bewerkstellende Auswertungen zur Verfügung.

5. Fazit

HydroNET-SCOUT bietet sowohl für den webbasierten Zugang zu online-Radardaten als auch zu ausgewerteten, hochqualitativen Radardaten mächtige, einfach zu bedienende Werkzeuge, die unter anderem Daten automatisiert darstellen, sowohl Zeitreihen als auch

Rasterbilder erzeugen, Vergleiche zu hinterlegten Statistiken erstellen, gezielt Starkregen herausuchen und damit die Erstellung von Auswertungen erheblich beschleunigen. Weitere Informationen sind in www.hydronet-scout.de und www.hydrometeo.de verfügbar.

Anwenderorientierte Bereitstellung hydrologischer Daten am Beispiel des Umwelt- und Datenportals iDA des Freistaats Sachsen

Toni Düskau, Peter Börke

Zusammenfassung

Moderne, webbasierte Geodatenportale bieten Fachleuten und der Öffentlichkeit gleichermaßen die Möglichkeit, sich sehr schnell und umfassend über Umweltdaten und hydrologische Fragestellungen zu informieren. Der Freistaat Sachsen hat für diese Zwecke ein anwenderfreundliches Tool geschaffen, das Umwelt- und Datenportal iDA (interdisziplinäre Daten und Auswertungen). Neben Umweltdaten aus unterschiedlichsten Bereichen (Boden, Geologie, Naturschutz, Wasser) spielen hydrologische Daten eine maßgebende Rolle. Der Datenpool umfasst hier nicht nur historische und tagesaktuelle Messdaten des landesweiten Messnetzes der Grundwassermessstellen, sondern auch spezifische Auswertungsmöglichkeiten und thematische Karten. Darüber hinaus ist die interoperable Einbindung von Diensten in andere Systeme wie GIS möglich. Dies stellt beispielsweise für Ingenieurbüros eine bedeutende Arbeitserleichterung dar.

1. Gesetzeslage

Laut Umweltinformationsgesetz (UIG) § 3 besteht für jede Person das Recht auf freien Zugang zu Umweltinformationen. Dies kann durch schriftliche Antragstellung bei der jeweiligen informationspflichtigen Stelle erfolgen (§ 4 UIG 2017). Um diesen aufwendigen Prozess jedoch zu vereinfachen, besteht nach § 7 UIG für die informationspflichtigen Stellen die Möglichkeit den Zugang zu verfügbaren Umweltinformationen, z.B. durch die Einrichtung öffentlich zugänglicher Informationsnetze oder Datenbanken, zu vereinfachen. Bei der Einrichtung solcher Informationskanäle gilt es jedoch zu beachten, dass der Schutz öffentlicher Belange eine hohe Priorität hat und Daten Dritter, Daten die personenbezogene Informationen oder beispielsweise Betriebs- oder Geschäftsgeheimnisse enthalten, nicht herausgegeben werden dürfen (§ 8 & § 9 UIG 2017).

2. Geoportale

2.1 Einleitung

Eine gute Möglichkeit um Umweltdaten übersichtlich und jederzeit zur Verfügung zu stellen sind webbasierte Geodatenportale. Dabei ist es wichtig, dass diese intuitiv zu bedienen sind und es dem Nutzer ermöglicht wird schnell an die benötigten Informationen zu gelangen. Dennoch setzt die Interpretation von Umweltdaten teils tiefgreifende Kenntnisse voraus. Anhand von Zusatzinformationen und Metadatenbeschreibungen können Hintergrundinformationen z.B. für die Datenerhebung oder Methodiken zur Erstellung thematischer Karten veröffentlicht werden. Hierbei spielt vor allen Dingen die Transparenz eine entscheidende Rolle, wodurch die Verständlichkeit und das Vertrauensverhältnis zwischen Anwendern und informationspflichtiger Stelle verbessert werden kann.

2.2 iDA

Der Freistaat Sachsen hat seine Geobasis- und Geofachdaten im eigenen Umwelt- und Datenportal iDA (interdisziplinäre Daten und Auswertungen) bereitgestellt. Dort können Nutzer

schnell Recherchen in Form von Tabellen, Diagrammen, Karten oder Berichten durchführen und mit den Fachdaten arbeiten. Grundsätzlich stehen dafür unterschiedlichste Themenbereiche wie Boden, Geologie, Naturschutz und Wasser zur Auswahl. So beinhaltet der Themenbereich Wasser neben dem Pegelnetz der oberirdischen Gewässer oder dem Landesmessnetz der Grundwassermessstellen auch dementsprechende historische und tagesaktuelle Messwerte sowie weiterführende Fachinformationen und thematische Karten.

Ferner besteht die Möglichkeit unterschiedlichste Layer in iDA zu kombinieren und zuzuschalten. Somit können personalisierte Datenzusammenstellungen und Ansichten erstellt werden, welche mittels Erstellung eines Permalinks dauerhaft abgespeichert und mit anderen Personen geteilt werden können. Durch Bereitstellung der angebotenen Daten als WMS- oder WFS-Dienste ist es zudem möglich diese in ein beliebiges GIS zu integrieren und unabhängig von der iDA-Benutzeroberfläche zu arbeiten.

3. Hydrologische Daten

3.1 Übersicht

Im Themenbereich Wasser im Umwelt- und Datenportal iDA sind folgende Informationen und Produkte abrufbar:

- Oberirdische Gewässer (z.B. Menge, Beschaffenheit, Einzugsgebiete, Strukturgüte)
- Grundwasser (z.B. Menge, Beschaffenheit, Messnetz, Hydroisohypsen, Flurabstand)
- Hochwasser (z.B. Risiko- & Gefahrenkarten, Intensitätskarte, Hochwassermarken)
- WRRL (z.B. Zustand & Bewirtschaftungsziele der Gewässerkörper)
- Wasserschutzgebiete (z.B. Trinkwasserschutzgebiete für Grundwasser & Talsperren)
- Wasserversorgung (z.B. Aufgabenträger & Zweckverbände)
- Abwasserbeseitigung (z.B. Aufgabenträger & Verdichtungsgebiete)
- Kommunale Kläranlagen

3.2 Grundwassermessstellen

Das Landesmessnetz des Freistaats Sachsen umfasst insgesamt ca. 1.600 Grundwassermessstellen, an welchen regelmäßig die Grundwasserstände gemessen und /oder Probenahmen durchgeführt werden, um Aussagen über die Grundwasserbeschaffenheit treffen zu können. Die Messung des Grundwasserstandes hingegen geschieht durch örtliche Beobachter oder wird mittels Technik der Datenfernübertragung (DFÜ) übermittelt. Im nächsten Arbeitsschritt werden die erhobenen Daten intern in einer Datenbank gespeichert und entsprechenden Plausibilisierungen unterzogen bevor sie letztlich im Umwelt- und Datenportal iDA einsehbar sind. Durch Bereitstellung der Grundwassermessstellendaten weiterer Messnetzbetreiber und historischer Daten sind letztlich Grundwasserstands- und Beschaffenheitswerte von ca. 4.000 Messstellen in iDA abrufbar.

3.3 Grundwasserstand

Anwender des Datenportals haben verschiedene Möglichkeiten die gemessenen Grundwasserstände einer Messstelle einzusehen. Zum einen können die Werte in tabellarischer Form angezeigt und heruntergeladen werden (CSV-Format). Diese Tabelle enthält zusätzlich zu den Messwerten auch die Koordinaten der Messstelle und die langjährigen Hauptwerte. Zum

anderen können die Werte für einen beliebigen Zeitraum auch direkt als Ganglinie graphisch aufbereitet und abgespeichert werden. Dabei steht auch eine Anzeige der Messwerte in „Meter unter Gelände“ zur Verfügung, was vor allen Dingen für Flurabstandsbetrachtungen relevant ist. Zu guter Letzt besteht die Option sich für jede Messstelle einen Bericht in PDF-Format ausgeben zu lassen, welcher die wichtigsten Informationen (Lage der Messstelle, langjährige Hauptwerte, langjährige Monatsmittelwerte, Ganglinie) kompakt zusammenfasst.

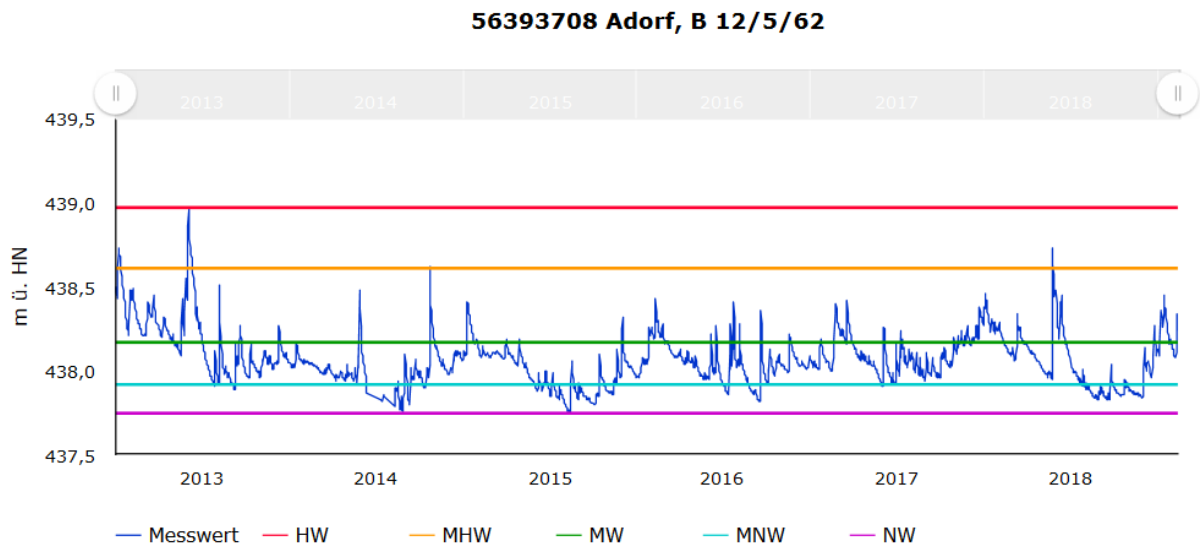


Abb. 1: Darstellung einer beispielhaften Ganglinie aus dem Umwelt- und Datenportal iDA für die Messstelle Adorf der Abflussjahre 2013 bis 2018.

Damit der Anwender die aktuell vorherrschende Grundwasserstandssituation besser beurteilen und verstehen kann, gibt es zudem eine Karte auf der ersichtlich ist welche Messstellen zum gegenwärtigen Zeitpunkt einen fallenden oder steigenden Trend haben. Diese Ansicht verzeichnete vor allem während Extremsituationen, wie beispielsweise im Trockenjahr 2018, vermehrte Zugriffe.

3.4 Grundwasserdynamik

Aussagen zur Grundwasserdynamik, wie beispielsweise Hydroisohypsen oder Grundwasserflurabstände sind für viele Fragestellungen von großer Bedeutung. Im Rahmen einer landesweiten Stichtagsmessung wurden im Frühjahr 2016 innerhalb von zwei Wochen 8.470 Grundwasserstände gemessen, um anschließend eine Grundwasseroberfläche für den Lockergesteinsbereich zu modellieren. Entstanden sind dabei ein flächendeckender Hydroisohypsenplan und Grundwasserflurabstände, welche für viele Aufgabenstellungen weiterverwendet werden können. Infolgedessen stehen diese thematischen Karten nicht nur als WMS-Dienste zur Verfügung, sondern sind auch als Raster- und Shapedateien downloadbar. Dadurch bieten sich für professionelle Nutzer viele Anwendungsmöglichkeiten, zumal ebenso die für die Modellierung der Grundwasseroberfläche verwendeten Stützstellen einsehbar sind. Weiterhin beinhalten die Hydroisohypsen auch eine Unterteilung bzgl. der Aus-

sagesicherheit. So sind geologisch komplexe Gebiete oder Areale mit geringer Stützstellenanzahl als unsicherer Verlauf gekennzeichnet, welches es dem Anwender ermöglicht diese Aussagen in seine abschließenden Beurteilungen mit einfließen zu lassen. Durch die Möglichkeit unterschiedlichste Layer im Umwelt- und Datenportal iDA zu kombinieren (z.B. Hydroisohypsen & aktuelle Grundwasserstände), können schnell erste Informationen gewonnen werden, die im Rahmen von Bauvorhaben oder Brunnenbohrungen wertvoll sind.

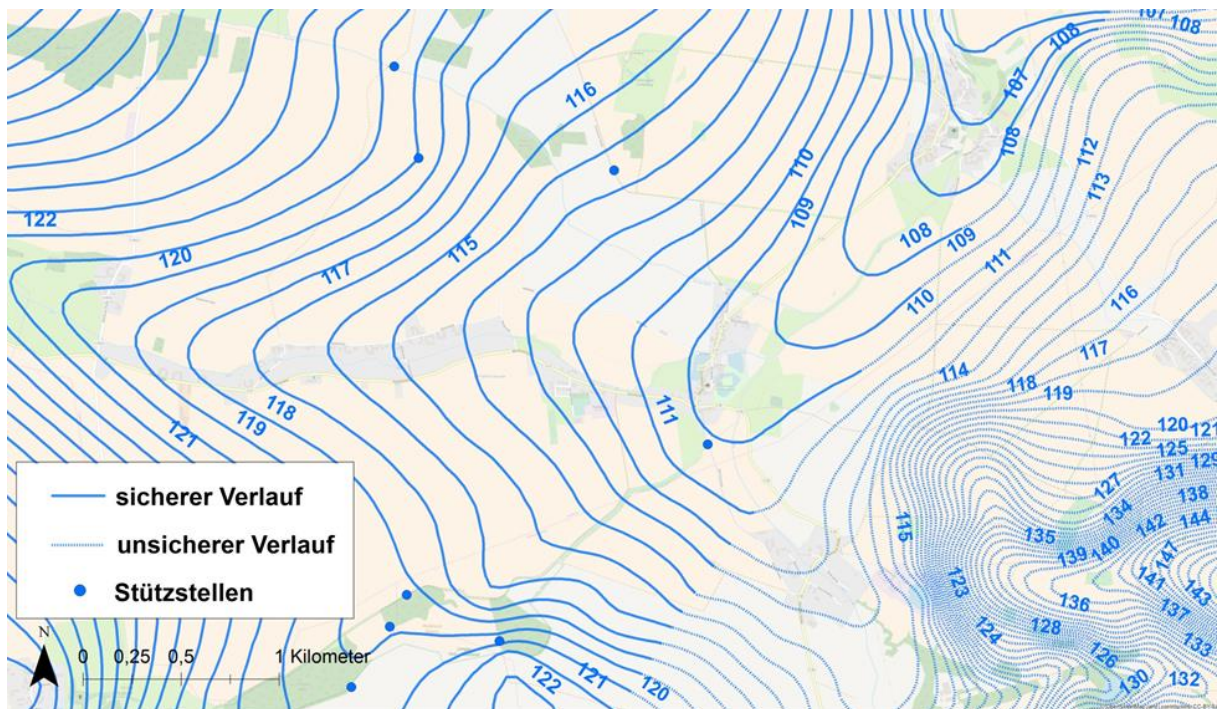


Abb. 2: Darstellung der Hydroisohypsen in einem Beispielgebiet (Lampertswalde), Angabe von unsicherem Verlauf aufgrund geringer Stützstellenanzahl

4. Fazit

Das vom Freistaat Sachsen bereitgestellte Umwelt- und Datenportal iDA erlaubt es Anwendern sich umfassend über aktuelle und historische hydrologische Daten zu informieren. Dabei werden zusätzlich unterschiedliche Karten bereitgestellt, welche für viele Fragestellungen nützliche Informationen liefern können. Durch die Möglichkeiten unterschiedliche Layer miteinander zu verknüpfen, zu teilen und dauerhaft abzuspeichern, können Anwender sich ein detailliertes Bild über die Hydrologie im Freistaat machen. Hinzu kommt, dass das Portal in Extremsituationen verstärkt zur Risikokommunikation und Information genutzt werden kann. Anzumerken ist auch, dass die Anwendung nicht nur von Planern, Ingenieuren und der Öffentlichkeit genutzt wird, sondern auch behördenintern zunehmenden Zuspruch erhält und zu einer Vereinfachung der Arbeitsprozesse führen kann.

Literatur

UIG, 2017. Umweltinformationsgesetz, zuletzt geändert durch Artikel 2 Absatz 17 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808).

Präventives Hochwassermanagement für ein tidebeeinflusstes Einzugsgebiet

Friederike Fischer, Gabriele Gönnert, Fred Hesser, Dieter Ackermann

Zusammenfassung

In tiefliegenden Marschgebieten führt der Tidenhub regelmäßig zu Einschränkungen der Binnenentwässerung. In Kombination mit hohem Niederschlag kann das zu Binnenhochwasser führen und stellt daher eine Herausforderung in der wasserwirtschaftlichen Praxis dar. Im Rahmen des Projektes Stuck wurde für die tidebeeinflusste Modellregion Dove-Elbe im Südosten Hamburgs ein Konzept zum optimierten, operativen Hochwassermanagement entwickelt. Dieses beruht auf Vorhersagedaten für Tide, Niederschlag und Abfluss. Auf Grundlage definierter Meldestufen für die Vorhersagen können frühzeitig Handlungsmuster umgesetzt und der Handlungszeitraum für operative Maßnahmen verlängert werden. In diesem Konzept werden durch Wasserstandsvorabsenkungen gezielt temporäre Retentionsräume geschaffen, um die Auswirkungen von Hochwasserereignissen zu mindern. Bei Anpassung der gebietsspezifisch festgelegten Meldestufen und Maßnahmen ist das Konzept auf andere Gebiete übertragbar.

1. Einleitung

Ziel des BMBF-Forschungsprojektes Stuck zur „Sicherstellung der Entwässerung küstennaher, urbaner Räume unter Berücksichtigung des Klimawandels“ ist die Entwicklung von allgemeingültigen, nachhaltigen Lösungsansätzen für die Gewässerbewirtschaftung küstennaher Fließgewässer. Ein besonderer Schwerpunkt liegt dabei auf der Entwässerung während Extremwetterereignissen und den Möglichkeiten der Steuerung von Schöpfwerken, Hochwasserrückhaltebecken und Retentionsräumen, sowie einer verbesserten Hochwasserwarnung. Darauf basiert auch das vorliegende Konzept zu einem optimierten, operativen Hochwassermanagement für tidebeeinflusste Binnengewässer.

Die natürlichen, periodischen Überschwemmungen durch die Tide sind charakteristisch für Marschgebiete. Um die fruchtbaren Marschböden trotzdem nutzen zu können, wird bis heute die Entwässerung dieser Gebiete durch Grabensysteme, Siele, Sperr- und Schöpfwerke sichergestellt. Die künstliche Drainage und der durch Eindeichung verhinderte Sedimenteintrag führen teilweise zu Absenkungen der Geländeoberfläche unter das Niveau des mittleren Tidehochwassers. Kommt es dort zu Niederschlag, besteht aufgrund der tiefen Lage ein erhöhtes Hochwasserrisiko, da die Entwässerung teilweise gegen das Gefälle stattfinden muss. In diesem Fall werden diese Bereiche durch Schöpfwerke in höher liegende Gewässer entwässert, um Überschwemmungen zu verhindern. Sind diese Gewässer tidebeeinflusst, kann es bei erhöhten Tidewasserständen zu eingeschränkter Entwässerung und Rückstau in den Flussläufen kommen. Dadurch wird die Gefahr für Hochwasser verstärkt. Besonders in Anbetracht der zu erwartenden Klimaveränderungen, die unter anderem mit einem Anstieg des mittleren Meeresspiegels und häufiger und intensiver auftretenden Regenereignissen einhergehen (IPCC 2013/14), bedarf die hydrologische Situation in Marschgebieten eines wirksamen Hochwassermanagements, um Schäden durch Überflutung zu vermeiden.

Da im Zuge der Urbarmachung und Urbanisierung natürliche Überschwemmungsflächen verloren gegangen sind, fehlen Retentionsräume für die im Hochwasserfall zu steuernden Wassermassen. Deshalb ist eine grundlegende Hypothese der vorliegenden Untersuchung, dass in flachen Marschgebieten die Flusssysteme selbst als Retentionsräume während po-

tentieller Hochwasserereignisse genutzt werden können, wenn frühzeitig eine Absenkung des Wasserspiegels eingeleitet wird. Die Maßnahme der Wasserstandvorabsenkung steht deshalb im Fokus der Untersuchung. Dafür ist die Analyse der Prognosemöglichkeiten und Betrachtung der möglichen Speichervolumina im Untersuchungsraum von Bedeutung.

2. Untersuchungsgebiet

Die Modellregion für die Konzeptentwicklung ist der hamburgische Teil des Einzugsgebiets der Dove-Elbe im Bezirk Bergedorf im Südosten Hamburgs. Dieser hat eine Fläche von 160 km². Wichtigster Zufluss der Dove-Elbe ist die Bille, die zusätzlich knapp 350 km² Geestfläche entwässert. Neben kleineren Nebenflüssen entwässert außerdem die Gose-Elbe in die Dove-Elbe. Die Gose-Elbe beginnt wie die Dove-Elbe als ehemaliger Nebenarm der Elbe im Südosten des Bezirks und fließt über die Reitschleuse in die Dove-Elbe. Die Dove-Elbe wird durch die Dove-Elbe-Schleuse in zwei Teile gegliedert (Abb. 1). Sowohl die Reitschleuse als auch die Dove-Elbe-Schleuse fungieren aktuell nicht mehr als Schleusen, sondern als Sperrtore (LSBG 2017). Die Dove-Elbe liegt in den sogenannten Vier- und Marschlanden. Diese weisen Geländehöhen zwischen NHN -1 m und NHN +1 m und werden deshalb künstlich über Schöpfwerke in das Flusssystem entwässert. Dabei entwässern vier Schöpfwerke die Gebiete Ochsenwerder, Reitbrook, Seefeld und Neuengamme in die Gose-Elbe und zwei Schöpfwerke die Gebiete Eichbaum/Moorfleet und Allermöhe in den unteren Teil der Dove-Elbe. Ein weiteres Schöpfwerk im Gebiet Riepenburg ist in erster Linie zur Bewässerung des Gebiets durch die Gose-Elbe im Sommer angelegt.

Die Modellregion wird größtenteils landwirtschaftlich genutzt und ist zu 17,3 % versiegelt.

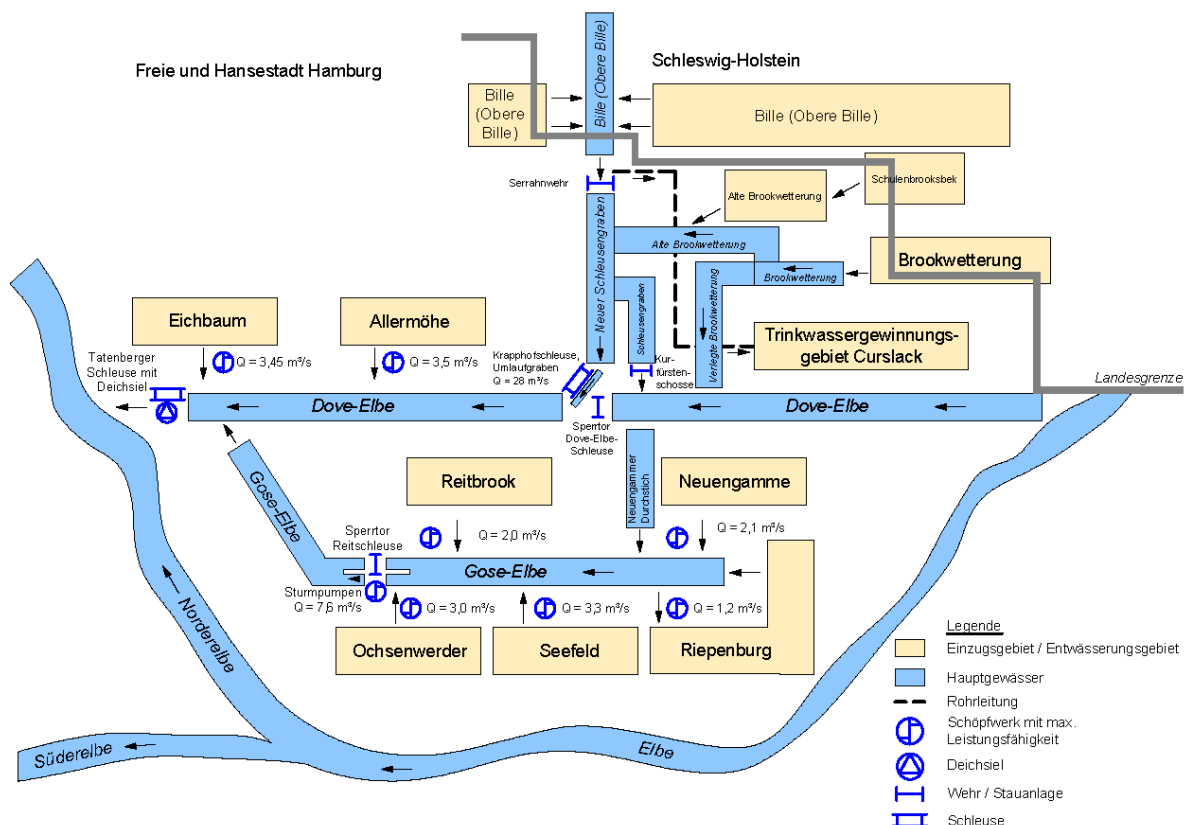


Abb. 1: Schematische Darstellung der Teileinzugsgebiete der Dove-Elbe mit Schöpfwerken, deren jeweiliger Schöpfleistung und Ent- und Bewässerungswegen im Normalfall (LSBG 2017).

3. Methodik und Daten

Für die Untersuchungen zum Hochwassermanagement an der Dove-Elbe wird ein normatives Zielszenario (best-case) konstruiert, bei dem durch frühzeitiges Erkennen eines bevorstehenden Hochwasserereignisses Präventivmaßnahmen eingeleitet werden, die das Hochwasser vermindern. Um Aussagen darüber treffen zu können, ob und mit welchem zeitlichen Vorlauf ein Hochwasserereignis im Untersuchungsgebiet vorhersagbar ist, wird anhand eines Hochwasserereignisses, das vom 05.01.2018 bis 08.01.2018 an der Dove-Elbe stattfand, der Verlauf von meteorologischen und hydrologischen Prognosen für das Untersuchungsgebiet nachgestellt und analysiert.

Für die Prognosen werden Daten der hochwasserbeeinflussenden Faktoren Tide, Niederschlag und Abfluss aus der Bille genutzt. Dafür werden Tidevorhersagezeitreihen für den Pegel St. Pauli herangezogen, die mit der Methode Modellausgabe-Statistik (MOS) vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie berechnet wurden. Außerdem Niederschlagsvorhersagen des Deutschen Wetterdienstes aus der Modellsimulation ICON-EU, sowie Radar-Nowcasts und Radarmessungen des Standorts Boostedt. Die ICON-EU-Daten bieten bei verhältnismäßig hoher räumlicher Auflösung den größtmöglichen Vorhersagezeitraum für das Untersuchungsgebiet. Auf dieser Grundlage konnte unter Berücksichtigung eines Abflussbeiwerts für ebene Grünflächen mit Kleiböden von 0,17 (MASUCH & OLB-RISCH 2014) ansatzweise das bei dem Niederschlag des Analysezeitraums im Untersuchungsgebiet zum Abfluss kommende Wasser berechnet und auf die Seichervolumina der steuerbaren Gebiete übertragen werden.

Anhand des Vorhersagezeitraums der betrachteten meteorologischen und hydrologischen Vorhersagen ist ein Hinweis auf ein mögliches Hochwasser auf Basis der Tidevorhersage sechs Tage im Voraus möglich. Für das Untersuchungsgebiet liegen Niederschlagsvorhersagen für einen Vorhersagezeitraum von bis zu fünf Tagen vor. Aussagen zum Abfluss am Pegel Reinbek sind 24 Stunden vor Eintritt möglich. Es sollten immer die aktuellen Vorhersagen betrachtet und falls nötig für eine bessere Situationseinschätzung in die Zukunft übertragen werden.

Um den Zufluss der Bille in die Dove-Elbe abschätzen zu können, werden Abflussvorhersagen für den Pegel Reinbek an der Bille genutzt, die auf Grundlage eines Vorfeuchteindex (GENNIS 2016) für das Einzugsgebiet des Pegels berechnet werden.

Nach dem Ansatz des Hindcastings wird der Vorhersageprozess nachgestellt, indem alle drei Stunden die Prognosen aller genannten Faktoren – soweit vorhanden – für acht verschiedene Zeiträume von +1 bis +120 Stunden betrachtet werden. Werden die Niederschlagsvorhersagen in Verbindung mit der Retentionsfähigkeit der Teileinzugsgebiete gesetzt, können Aussagen zur Hochwassergefährdung gemacht werden.

Um diese Prognosen und ihre potentiellen Auswirkungen detailliert für Teilgebiete des Untersuchungsgebiets darstellen zu können, findet zuvor eine Gliederung der verschiedenen steuerbaren Schöpfwerksgebiete und anhand eines Digitalen Geländemodells (DGM) und punktuellen Tiefenmessungen eine grundlegende Analyse der Morphologie statt. Dabei werden zum einen Speichervolumina innerhalb der Deichlinien und in den Gräben der Schöpfwerksgebiete berechnet, sowie die Größen der Teileinzugsgebiete und der sich in ihnen be-

findlichen Speicherkapazitäten bestimmt. Auf dieser Grundlage können die Prognosen und ihre potentiellen Auswirkungen auf die Teileinzugsgebiete übertragen werden.

Um anhand der Prognosen Maßnahmen einleiten zu können, werden mittels Statistiken jeweils drei gebietsspezifische Schwellenwerte pro Prognosegruppe definiert.

Für die erste Meldestufe der Vorhersage des Tideniedrigwassers wird auf Grundlage der Statistik der Pegelmessungen ermittelt, ab welchem Tidewasserstand die Binnenentwässerung erkennbar eingeschränkt wird. Dafür werden die Sielzeiten des Tatenberger Siels für die hydrologischen Jahre 2016 und 2017 ausgewertet. Es werden jeweils die Zeiten ermittelt, zu denen der Außenwasserstand unter NHN +90 cm, dem Normalwasserstand der Dove-Elbe, liegt. Da aus Gründen der Bauwerkssicherheit ab einer Wasserstandsdifferenz zwischen Binnen- und Außenwasserstand von mehr als 160 cm keine Entwässerung mehr über das Siel stattfinden kann, werden die Zeiträume, in denen das der Fall ist, ebenfalls berücksichtigt. So können die Zeiträume der Tiden, in denen Entwässerung möglich war, exakt ermittelt werden. Anhand von Angaben zum Abfluss bei verschiedenen Differenzwasserständen (STOLL ET AL. 2015) wird in Dezimeterschritten das Volumen des Wassers berechnet, das das Deichsiel durchfließt. So wird näherungsweise ermittelt, ab welchem Niedrigwasserstand das Sielzugvolumen geringer ist als üblich.

Die zweite Meldestufe entspricht dem Normalwasserstand der Dove-Elbe, bei dem es zu einer Sperrtide kommt, wenn das Niedrigwasser in der Tideelbe diesen Wert nicht unterschreitet. Die dritte Warnschwelle entspricht zwei Sperrtiden; also zwei aufeinander folgenden Tideniedrigwasserstandswerten über dem Normalwasserstand der Dove-Elbe.

Die Basis der Schwellenwerte für den Niederschlag sind der KOSTRA-Atlas des DWD und Angaben zum Bemessungsregen der Stadt Hamburg (FREIE UND HANSESTADT HAMBURG 2003). Die erste Meldestufe ist an den Niederschlagshöhen mit einer halbjährlichen Wiederkehrzeit angelehnt. Anhand der Niederschlagshöhen mit einem ein- und zweijährigen Wiederkehrintervall werden die zweite und dritte Meldestufe festgelegt. Für jede untersuchte Dauerstufe wird jeweils ein Mittelwert der betrachteten Rasterfelder ermittelt, von dem ein Toleranzbetrag von 10 % subtrahiert wird. Dieser Vorgang wird vom DWD für Planungszwecke auf Grundlage der KOSTRA-Daten empfohlen. Wenn die entsprechenden Daten nicht im KOSTRA-Atlas hinterlegt sind, wird auf Daten zum Bemessungsregen der Stadt Hamburg zurückgegriffen.

Die Schwellenwerte des Abflusses am Pegel Reinbek beruhen auf der Statistik der 33-Jahresreihe von 1984 bis 2016 (LLUR 2016). Das arithmetische Mittel von MQ und HQ_1 bildet die erste Meldestufe. Die Abflüsse HQ_1 und HQ_2 dienen als zweite und dritte Meldestufe.

Vorschläge für Präventivmaßnahmen werden auf Grundlage der Gebietseigenschaften, der Analyse der Vorhersagen und den daraus resultierenden Möglichkeiten getroffen. Die Wirksamkeit einiger Maßnahmen wird im Projekt Stuck anhand eines Niederschlag-Abfluss-Modells (N-A-Modell) geprüft.

4. Hochwassermanagement auf Grundlage von Vorhersageinformationen

4.1. Analyse der Vorhersagen

Auf Grundlage der Generierung der ortsspezifischen Warnschwellen (Tab. 1) kann der Prognoseverlauf analysiert werden. Um eine Gesamtmeldestufe aus allen Prognosen zu ermitteln, wird zunächst eine Binnenseitige Warnstufe aus Abflussvorhersage und Niederschlagsvorhersage gebildet und daraufhin diese mit der Tidevorhersage kombiniert. Dies geschieht durch die Gegenüberstellung der jeweiligen Prognosen in einer Matrix, die alle Meldestufen der jeweiligen Vorhersagen beinhaltet. Werden bei beiden Vorhersagen Warnschwellen überschritten, wird zu einer entsprechend höheren Warnung aufsummiert. Auf Grundlage der Gesamtmeldestufe können Maßnahmen eingeleitet werden. Diese Vorgehensweise wird für jeden Betrachtungszeitpunkt und für jeden Vorhersagezeitraum durchgeführt.

Tab. 1: Schwellenwerte für drei Warnstufen der hochwasserbeeinflussenden Faktoren

	1. Meldestufe	2. Meldestufe	3. Meldestufe
Niedrigwasser [NHN cm]	-10	100	Zwei Sperrtiden (2 x 100 cm)
Niederschlag [mm]			
30 min	7,60	11,01	13,98
60 min	9,31	13,14	17,28
90 min	10,45	14,40	18,75
120 min	11,40	15,39	19,92
6 h	15,77	19,71	24,99
12 h	19,29	23,07	28,83
24 h	22,33	27,03	33,36
48 h	29,17	34,02	41,13
72 h	36,10	28,94	46,50
96 h	40,00	46,35	54,81
120 h	43,90	50,40	59,22
Abfluss Pegel Reinbek [m³/s]	7,96	13,40	15,24

4.2. Gebietsspezifische Maßnahmen

Die Ableitung von Maßnahmen findet auf Basis der Gebietscharakteristika statt. Aufgrund der geringen Retentionsmöglichkeiten im Untersuchungsgebiet liegt in diesem Fall der Fokus der Maßnahmen auf der Steuerung der Wasserbauwerke bzw. der Wasserstandsvorabsenkung. Dabei wird auf Grundlage der Vorhersagen kurzfristig Speichervolumen in Gräben und/oder dem Flussbett geschaffen, sodass temporär anfallende Wassermengen aufgenommen, das gesamte System entlastet und damit der Hochwasserscheitel gemindert werden kann.

Für das Einzugsgebiet Dove-Elbe werden folgende Maßnahmen je Meldestufe festgelegt.

1. Meldestufe: Vollständige Entleerung der Schöpfwerksgräben in den Schöpfwerksgebieten und daraufhin Umstellung der Schaltwasserstände auf Sommerwasserstand in den Gebieten Ochsenwerder, Reitbrook, Seefeld und Neuengamme und Spülwasserstand in Allermöhe

und Eichbaum/Moorfleet. Dies lässt einen höheren Wasserstand zu als im Winter normalerweise vorgesehen, ist für das System aber nicht schädlich, da dies nur vorübergehend stattfindet. So kann ein mögliches Speichervolumen von gut 1.530.000 m³ erreicht werden.

2. Meldestufe: Neben den Maßnahmen der ersten Meldestufe beinhaltet die zweite Meldestufe eine Absenkung der Wasserstände in den Gewässern Dove-Elbe und Gose-Elbe auf NHN +50 cm. Untersuchungen mit dem N-A-Modell der Technischen Universität Hamburg für das Untersuchungsgebiet haben ergeben, dass ab diesem Wasserstand durch das gewonnene Speichervolumen der Hochwasserscheitel deutlich abgesenkt werden kann. Die Schalthwasserstände sollten zurück auf den Normalwasserstand gestellt werden, sobald keine weitere Sperrtiden zu erwarten sind oder vorher, wenn ein Abfall der Wasserstände absehbar ist.

3. Meldestufe: Zu den Maßnahmen der anderen Warnstufen kommt eine manuell gesteuerte weite Öffnung des Tatenberger Siels, sodass eine Entwässerung über dem Bereich $\Delta h = 160$ cm ermöglicht wird. Zwar bietet diese Maßnahme ein gewisses Risiko für die Bausubstanz, stellt aber im Notfall eine Option dar. Wird mit dieser Maßnahme frühzeitig begonnen, kann die Überschreitung der Grenze der Durchflussgeschwindigkeit von 2,5 m³/s gemindert und so die Beanspruchung der Bausubstanz verringert werden. Ist die rote Meldestufe erreicht, sollte versucht werden, auf diese Weise so viel Wasser wie möglich frühzeitig aus dem System abzuführen, es sei denn, es ist absehbar, dass die Pegelstände fallen. Die Rückführung in die Automatisierung sollte erfolgen, wenn keine Warnungen über die Pegelstände mehr eingehen.

Die modelltechnische Überprüfung dieser Maßnahmen zeigt, dass allein die Kombination der ersten beiden Maßnahmen bei einem weiteren Hochwasserereignis vom 6./7.02.2011 zu Absenkungen des Hochwasserstandes um 16 cm geführt hätten.

4.3. Zeitliches Management

Um die Gräben der Schöpfwerksgebiete vollständig bis in die Tideelbe zu entwässern, werden laut des zuständigen Bezirksamtes nicht mehr als 48 Stunden benötigt. Beeinflusst wird der Abfluss durch die Verkrautung der Gräben und Niederschlag. Vorabsenkungen im Flussbett der Dove-Elbe lassen sich schneller herbeiführen als in den Schöpfwerksgräben. Sollte durch eine Sperrtide, eine zu hohe Wasserstandsdifferenz oder durch hohe Außenwasserstände, die Entwässerung stark eingeschränkt sein oder gar nicht stattfinden, ist entsprechend mehr Zeit nötig (WEHLING 02.11.2017, persönliche Kommunikation). Es empfiehlt sich, das Einleiten von Maßnahmen auf die Vorhersagen bis 48 Stunden zu beschränken, um so nah wie möglich am eigentlichen Ereignis zu sein und potenzielle Vorhersagefehler so gering wie möglich zu halten. Werden bei längerfristigen Vorhersagen schon Meldestufen überschritten, können Vorwarnungen ausgesprochen werden, die zu einer höheren Bereitschaft oder ähnlichem führen. Abbildung 2 zeigt die erläuterte Verfügbarkeit der Prognosedaten, bzw. wann diese erstmalig Hinweise auf ein zukünftiges Hochwasser geben und den Zeitpunkt, an dem im Untersuchungsraum potenzielle Maßnahmen eingeleitet werden sollten. Dies schließt eine frühere oder spätere Einleitung von Maßnahmen aber nicht aus.

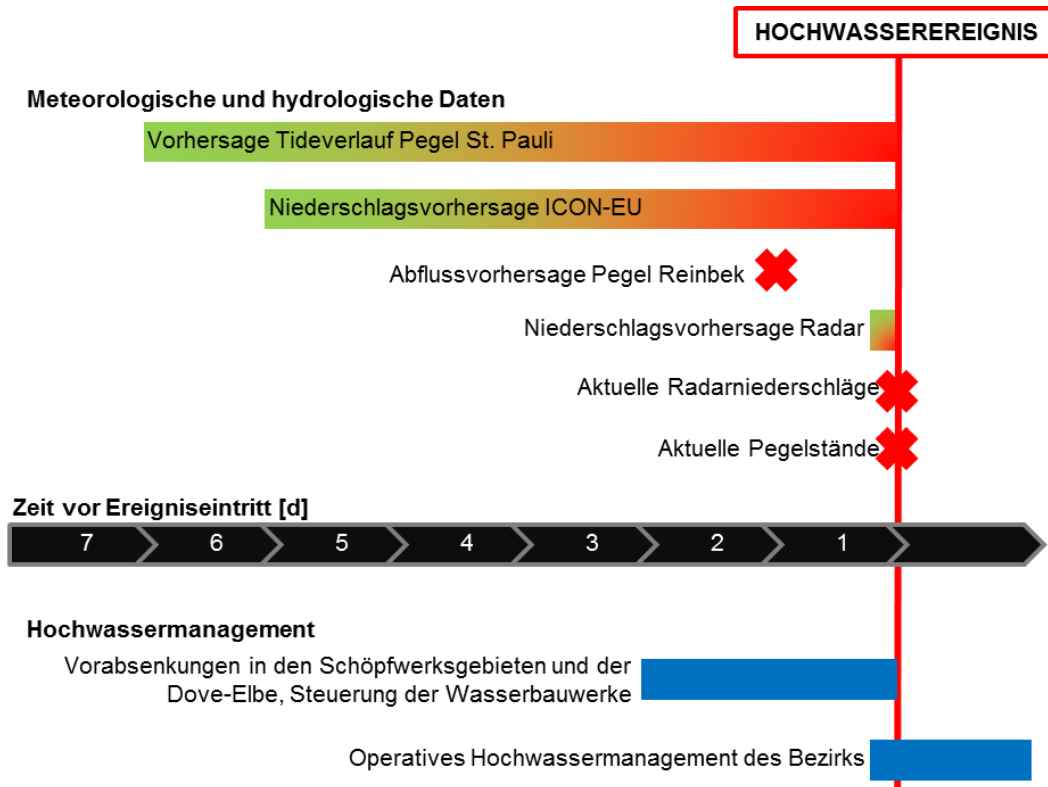


Abb. 2: Schematische Darstellung des präventiven Hochwassermanagementkonzeptes mit zeitlicher Verfügbarkeit der Vorhersagedaten und unterschiedlicher Maßnahmen

5. Ergebnis

Die praktische Anwendung des Konzepts auf das Hochwasserereignis vom 05. bis 08.01.2018 zeigt, dass anhand der definierten Meldestufen schon frühzeitig Hinweise auf das Ereignis vorlagen (Abb. 3). Ungeachtet der Vorhersagen vor dem 30.12.2017 wäre nach den ermittelten Schwellenwerten am 31.12.2017 um 00:00 Uhr die erste Vorwarnung für den akkumulierten Niederschlag der nächsten 4 Tage eingegangen. Ab diesem Zeitpunkt hätte eine verstärkte Bereitschaft eingeleitet werden können. Der erste Alarm, durch den eine Maßnahme eingeleitet worden wäre, weil er durch eine Vorhersage für die nächsten 48 Stunden ausgelöst wurde, fand am 01.01.2018 um 9 Uhr durch die Abflussvorhersage statt. Damit wären zwei Tage früher Maßnahmen eingeleitet worden, als es an diesem Ereignis passierte. Der Verlauf der ausgelösten Meldestufen zu dem Beispielergebnis mit den entsprechenden Wasserstandsganglinien ist Abbildung 3 dargestellt.

Nach dem hier erarbeiteten Maßnahmenkonzept hätte der zeitliche Ablauf der Einleitung der Maßnahmen folgendermaßen aussehen können.

- 01.01.2018, 09:00 → Vollständige Entwässerung der Schöpfwerksgräben im Bereich der Gose-Elbe und Anpassung der Schaltwasserstände in allen Schöpfwerksgebieten
- 03.01.2018, 00:00 → zusätzlich Absenkung der Wasserstände in den Gebietseinheiten Dove-Elbe und Gose-Elbe auf NHN +50 cm und Zulassung der Entwässerung im Bereich über $\Delta h = 160$ cm am Tatenberger Deichsiel

- Bei Unterschreitung der Pegelstände in der Dove-Elbe, anhand derer der Bezirk die Schließungen von Dove-Elbe- und Reitschleuse veranlasst: Wiederaufnahme der automatischen Steuerung am Deichsiel Tatenberg
- 09.01.2018, 07:30 → Einstellung der üblichen Schaltwasserstände

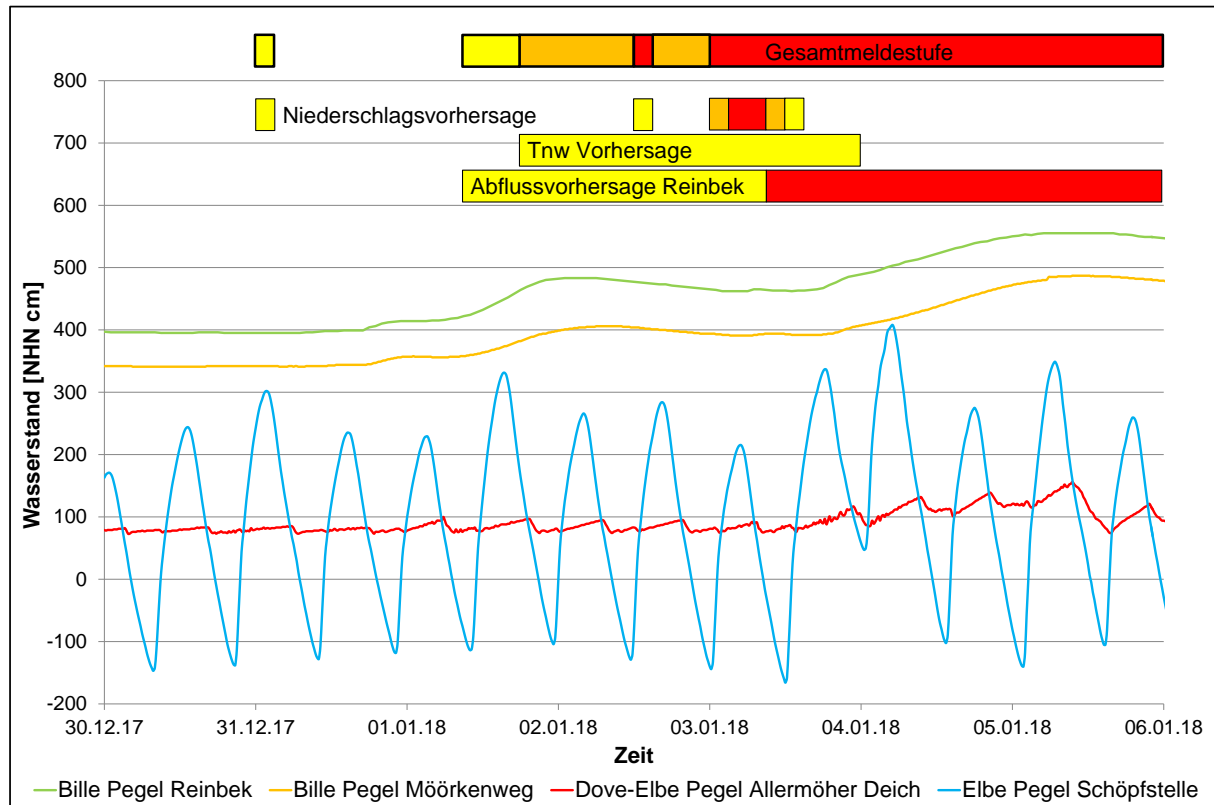


Abb. 3: Auslösung der festgelegten Warnstufen vor und während des Hochwasserereignisses vom 05.–08.01.2018 mit seinen Pegelständen

6. Diskussion und Fazit

Ziel der Untersuchung war es, ein Konzept zum optimierten operativen Hochwassermanagement zu entwickeln, bei dem aufgrund bestimmter Vorhersagen ein definierter Handlungsablauf verfolgt wird, wodurch der Zeitraum für Maßnahmen verlängert wird. Die Analyse hatte das Zielszenario eines Hochwasserereignisses, das durch Präventivmaßnahmen verhindert oder gemindert wird, welche auf Grundlage von hydrologischen und meteorologischen Vorhersagen für das Untersuchungsgebiet im Vorfeld eingeleitet werden.

Auf Basis von gebietspezifischen Statistiken der Einflussfaktoren Tide, Niederschlag und Abfluss konnten Schwellenwerte für ein Warnsystem entwickelt werden, anhand derer Maßnahmen zur Minderung eines potenziellen Hochwassers eingeleitet werden können.

Sobald durch die Vorhersagen die definierten Schwellenwerte überschritten werden, werden je nach Vorhersagezeitraum eine Vorwarnung oder Handlungsempfehlungen ausgelöst. Die Handlungsempfehlungen werden bei Warnungen für den Zeitraum der nächsten 48 Stunden ausgesprochen. Sie beruhen auf einer Maßnahmenmatrix, die je nach Kombination der Vorhersagewarnungen zwischen drei Handlungsmustern unterscheidet. Diese Handlungsmuster sind auf die Sturmflutseason ausgelegt.

Durch die Aufbereitung des Vorhersageprozesses für das Binnenhochwasserereignis vom 05.01. bis 08.01.2018 wird deutlich, dass durch das entwickelte Warnsystem das Hochwasserereignis im Vorfeld erkannt und bei Anwendung des Konzepts entsprechende Maßnahmen hätten eingeleitet werden können. Dabei wäre für den Handlungszeitraum ein Gewinn von zwei Tagen entstanden. Die Prüfung der vorgeschlagenen Maßnahmen im Untersuchungsgebiet zeigt, dass bei ihrer Anwendung der maximale Wasserstand des Hochwassers hätte gesenkt werden können. Die Wasserstandsvorabsenkung stellt also eine gute Möglichkeit für den Hochwasserschutz tidebeeinflusster Marschgebiete dar.

Welches Ausmaß die Minderung des untersuchten Hochwassers erreicht hätte, muss durch Modellsimulation geklärt werden. Vor einer Umsetzung in der Praxis muss zudem die Verträglichkeit des Konzepts mit der Umgebung und der Aufwand einer Umsetzung untersucht werden.

Eine Optimierung des Konzepts kann erreicht werden, wenn mehr Vorhersagen, wie z. B. Ensemble-Vorhersagen genutzt werden, um eine bessere Treffsicherheit zu erreichen. Außerdem ist eine länderübergreifende Kommunikation bzw. ein Konzept anzustreben, um die Handlungsmöglichkeiten im gesamten Einzugsgebiet (inkl. Schleswig-Holstein) auszunutzen. Als unmittelbarer nächster Schritt wird die häufigere Berechnung der Abflussvorhersage für die Bille eingeleitet, damit in diesem Fall durch den LSBG bessere Aussagen für potenzielle Hochwasserereignisse getroffen werden können. Außerdem wird die Überprüfung des Konzepts in einem hydrodynamisch-numerischen Modell des Untersuchungsgebiets beim LSBG vorbereitet, auf deren Grundlage Anpassungen und Weiterentwicklungen stattfinden können. Im weiteren Verlauf sollten die Maßnahmen, wo möglich, automatisiert werden. Ein „blindes“ Vorgehen durch eine Automatisierung wird allerdings nicht empfohlen. Stattdessen sollte das menschliche Urteilsvermögen weiterhin in den Einleitungsprozess der Maßnahmen einbezogen werden und dabei immer das zurückliegende und aktuelle Geschehen Berücksichtigung finden.

Das entwickelte präventive Hochwassermanagementkonzept stellt eine Möglichkeit zur Minderung von potenziellen Hochwasserschäden im Untersuchungsgebiet dar und bietet eine Grundlage, die weiter entwickelt und verbessert werden und als präventives Hochwassermanagement operationell implementiert werden kann. Das Konzept kann auf andere tidebeeinflusste Flusseinzugsgebiete übertragen werden. Dafür sind Anpassungen der Warnschwellenwerte nötig, sowie die Berücksichtigung der Einzugsgebietsgröße und der zur Verfügung stehenden Speichervolumina. Je nach Größe des Einzugsgebiets und Speicherkapazitäten sind differierende Absenkungen und Handlungszeiträume möglich. Das Konzept bietet besonders in Hinblick auf die anstehenden Klimaveränderungen eine nützliche Ergänzung bestehender Hochwassermanagementkonzepte in tidebeeinflussten Flusseinzugsgebieten.

Literatur

Freie und Hansestadt Hamburg (Hg.) 2003. Bemessungsregen. Regenreihen der Freien und Hansestadt Hamburg. Zur Bemessung oberirdischer Gewässer und öffentlicher Abwasseranlagen. Unter Mitarbeit von Erik Pasche und Timm R. Geissler. Behörde für Bau und Verkehr, Amt für Bau und Betrieb, Abteilung Gewässer, Hamburg.

- Gennis, S., 2016. Anwendung und Evaluierung eines Vorfeuchteindex zur Ermittlung des Abflussverhaltens am Beispiel der Bille. Bachelorarbeit. Universität Hamburg, Hamburg. Institut für Geographie.
- Hamburg Port Authority (HPA) (Hg.), 2017. Gewässerkundliche Information. Gewässerkundliches Jahr 2017. Pegel St. Pauli. Online verfügbar unter https://www.hamburg-port-authority.de/fileadmin/user_upload/Gewaesserkundliche_Information_2017.pdf, zuletzt geprüft am 05.06.2018.
- IPCC, 2013/2014. Klimaänderung 2013/2014. Zusammenfassungen für politische Entscheidungsträger. Beiträge der drei Arbeitsgruppen zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC). Deutsche Übersetzungen durch Deutsche IPCC- Koordinierungsstelle, Österreichisches Umweltbundesamt, ProClim, Bonn/Wien/Bern, 2016.
- Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (LLUR) (Hg.), 2016. Stammdaten für Pegel Reinbek: Abfluss. Online verfügbar unter http://www.umweltdaten.landsh.de/nuis/wafis/pegel/dgj/114094_Q_2016.pdf, zuletzt geprüft am 22.03.2018.
- Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer (LSBG) (Hg.), 2017. BMBF- Projekt Stuck Zwischenbericht 2016-2017. Projektbericht Gewässer und Hochwasserschutz Nr. 1/2017. Unter Mitarbeit von Dieter Ackermann, Thomas Einfalt, Annette Eschenbach, Peter Fröhle, Sarah Gennis, Alexander Gröngröft et al. Hamburg.
- Masuch & Olbrisch, 2014. Wohnbebauung „Avenberg“ Erschließung B-Plan Ochsenwerder 13 in Hamburg-Bergedorf. Erläuterungen zur Entwässerung. Oststeinbek.
- Stoll, S.; Greuner-Pönicke, S.; Mattern, S., 2015. Machbarkeitsstudie zur Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit gemäß EU-WRRRL im Bereich der Tatenberger Schleuse. Erläuterungsbericht. Hg. v. Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt (BSU). Ingenieurbüro Dr. Lehnert + Wittorf; BBS Büro Greuner-Pönicke. Lübeck.

Persönliche Kommunikation

- Wehling, U., 02.11.2017. Persönliches Gespräch mit dem Leiter der Wasserwirtschaft des Bezirks Bergedorf.

Starkregen und Hochwasser im ländlichen Raum – Ein kooperativer Ansatz zur Organisation von Hochwasserabwehr und Bewältigung für die Stadt Glashütte

Jens Grundmann, Judith Schache, Kerstin Lehmann, Patric Röhm

Zusammenfassung

Im Spannungsfeld zwischen einer Häufung von Starkregenereignissen und resultierendem Hochwasser einerseits und einer zunehmenden Belastung meist freiwilliger Einsatzkräfte bei der Bewältigung von Katastrophen andererseits sind Anpassungen existierender Strukturen des Bevölkerungsschutzes erforderlich. In diesem Kontext wird ein kooperativer Ansatz unter Mithilfe der Bevölkerung für die Organisation von Hochwasserabwehr und Bewältigung, speziell in ländlichen Raum, vorgestellt. Der Ansatz beinhaltet drei Bausteine: (i) eine Gefährdungsanalyse basierend auf dem regional vorhandenen Wissen der Bevölkerung, (ii) dem Aufbau eines Pools ungebundener Helfer zusammen mit lokalen Akteuren der Stadtwehrleitung und Ortsteilfeuerwehren, (iii) ein Informationsnetzwerk, betrieben unter Mithilfe der Bevölkerung. Der Beitrag vermittelt Erfahrungen und Ergebnisse aus den drei Bausteinen und der Zusammenarbeit mit den lokalen Akteuren und der Bevölkerung.

1. Motivation und Ziel

Der Klimawandel und seine Folgen lassen auch für die Region des Osterzgebirges eine Zunahme kleinräumiger Starkniederschläge erwarten (Bernhofer, et al., 2011). Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, existierende Strukturen des Bevölkerungsschutzes an die zunehmende Zahl von Extremwetterereignissen anzupassen. Analysen des Deutschen Komitees für Katastrophenvorsorge zeigen nach wie vor Bedarf in der Stärkung der Eigenvorsorge, Warnung und Katastrophenabwehr, der Verbesserung der Zusammenarbeit zwischen professionellen und freiwilligen Einsatzkräften sowie der Einbindung freiwilliger Helfer und des Dialogs mit potenziell Betroffenen (Thieken, 2015). Das Projekt VEREINT (<http://vereint.cimtt.de/>) - Kooperativ organisierter Bevölkerungsschutz bei extremen Wetterlagen – greift diese Handlungsfelder auf und erarbeitet ein pilothaftes Konzept zur Bewältigung lokal auftretender Starkregen-/Sturzfluten und daraus erwachsender Hochwasserereignisse zusammen mit und für die Stadt Glashütte. Es bewegt sich im Spannungsfeld einerseits kleiner, unbeobachteter Einzugsgebiete mit kurzen Reaktionszeiten des Abflusses sowie andererseits sinkenden Mitgliederzahlen und erforderlichen Rüstzeiten der freiwilligen Einsatzkräfte. Das Konzept zielt auf eine Stärkung der lokalen, freiwilligen Einsatzkräfte bei der Gefahrenabwehr und Bewältigung im ländlichen Raum und wird zusammen mit lokalen Verantwortlichen des Bevölkerungsschutzes unter Einbezug der Bevölkerung entwickelt.

2. Die Region

Das Gemeindegebiet der Stadt Glashütte und befindet sich Mittelgebirgsvorland des Osterzgebirges und umfasst eine Fläche von 95,6 km² gelegen zwischen 260 bis 637 m.ü.NN. In der Gemeinde leben circa 7000 Einwohner. Es gibt 16 Ortsteile (inkl. Stadt Glashütte) mit 10 Freiwilligen Feuerwehren. Die Gemeinde ist für 124km Fließgewässer zuständig (Stadt Glashütte, 2018). Diese haben ihre Quelle meist auf den Hochebenen der Region und fließen durch teilweise steile und tief eingeschnittene Täler ab. Hochwasserereignisse infolge Starkregens sind deshalb meist durch eine hohe Dynamik mit schnellen Anstieg des Abflusses und geringer Dauern gekennzeichnet, meist einhergehend mit frei abfließendes Oberflä-

chenwasser in den Oberläufen und hoher Erosionsneigung, bedingt auch durch eine überwiegend landwirtschaftliche Nutzung.

3. Der kooperative Ansatz zu Stärkung des Bevölkerungsschutzes

Der Ansatz beinhaltet u.A. folgende Bausteine, die im folgendem kurz vorgestellt werden:

- eine Gefährdungsanalyse zur Identifikation von Gefahrenstellen mittels Crowdsourcing,
- den Aufbau eines Pools ungebundener Helfer,
- den Aufbau eines lokalen Informationsnetzes.

3.1 Gefährdungsanalyse mittels Crowdsourcing

Für ein verbessertes, kooperatives Handeln zur Hochwasserabwehr und -bewältigung sind Kenntnisse zu existierenden und möglichen Gefährdungen hilfreich und notwendig. Die hierfür notwendige Datenbasis wurde mit einer retrospektiven Datenerhebung unter Mithilfe der Bevölkerung der Pilotkommune (crowdsourcing) durchgeführt. Der Ansatz des Crowdsourcing beinhaltet ein Workshopkonzept für Gesprächsrunden in den Ortsteilen sowie ein webbasiertes lagegenaues Hochwasser/Schaden-Erfassungstool zur Datenerhebung. Erfasst und lagegenau verortet wurden Daten und Informationen zu Niederschlägen und Unwettererscheinungen, Überflutungen und resultierenden Schäden sowie zur Hochwasserabwehr und Bewältigung. Insgesamt wurden 11 Ereignisse mit ausgeprägten Hochwassererscheinungen zwischen 2002-2017 identifiziert, wobei 7 Ereignisse auf Starkregen zurückzuführen sind.

Die Ereignisse wurden niederschlagsseitig mit Hilfe von Radarniederschlägen unter Verwendung des RADOLAN-RW-Produktes des DWD verifiziert und statistisch anhand der KOSTRA-Daten des DWD eingeordnet. Hingewiesen sei an dieser Stelle auf Unsicherheiten, die dieses Vorgehen birgt, speziell bei Verwendung von Radarniederschlägen. Die identifizierten Starkregenereignisse zeigen eine sehr kleinräumige Struktur, wodurch die Aneichung der Radardaten an Bodenmessungen erschwert wird. Zudem bedingt die Höhe der Radarniederschlagsmessung über dem Boden eine fehlerhafte Lokalisierung des Ereignisses. So konnten z.B. in einem Ortsteil keine Hochwassererscheinungen festgestellt werden, obwohl diese entsprechend dem Radarniederschlag vorhanden gewesen sein müssten. Weitere Informationen und Details sind in Grundmann et al. (2018) nachzulesen.

Durch die Datenerhebung in den Ortsteilen konnten zahlreiche Überflutungen und Schäden erfasst werden. Die Datenbank weist hierzu über 80 Einträge auf, die Rückschlüsse auf Gefahrenhotspots im Pilotgebiet ermöglichen. Diese basieren auf den Erfahrungen und Kenntnissen der Bürger mit den Ereignissen der Vergangenheit. Sie erlauben jedoch keine umfassende, statistische Bewertung sowie Einschätzung zukünftiger Gefahren, weshalb hydrologische Modellsimulationen mit Hilfe von Niederschlags-Abfluss Modellen durchgeführt wurden. Da allerdings in den kleinen Einzugsgebieten im ländlichen Raum keine Abflussbeobachtungen für eine Modellkalibrierung vorlagen, erfolgte eine modellbasierte Rekonstruktion des Hochwasserablaufs anhand von Fotos und qualitativen Informationen der Bevölkerung zu beobachteten Oberflächenabflüssen. Basierend auf Vermessungen von Querprofilen und historischer Wasserstände waren so Rückschlüsse auf die Durchflussmengen und eine Be-

wertung der Hochwassergefährdung möglich, wobei das hydrodynamisch/hydraulische Modell HecRas 5.0.3 (Brunner, 2016) für den Abflusstransport und das prozessorientierte, hydrologische Modell WaSim-ETH 10.00.03 (Schulla, 2017) zur Simulation des 2D-Oberflächenabflusses zum Einsatz kommen (siehe auch Grundmann et al. 2018).

3.2 Aufbau eines ‚Pools‘ ungebundener Helfer

Der Aufbau eines Pools ungebundener bzw. freiwilliger Helfer (auch Helferinnen; im Folgenden als Helfer bezeichnet) zielt auf die Einbindung von Freiwilligen ab, die durch Übernahme von „einfachen“ Arbeiten als Unterstützer für die Einsatzkräfte unterschiedlicher Organisationen (z.B. Freiwillige Feuerwehr, Rettungsdienste) fungieren. Als ungebundene Helfer werden Personen verstanden, die keiner Einheit einer Behörde und/ oder Organisation mit Sicherheitsaufgaben (BOS) angehören. Sie erklären sich freiwillig bereit in Starkregen und Hochwassersituationen bei der Gefahrenabwehr und -bewältigung mitzuwirken. Als potenzielle Helfer kommt grundsätzlich jeder Bürger und Bürgerin, unabhängig von Alter und Ausbildung, aber auch Unternehmen aus der Kommune Glashütte bzw. den angrenzenden Ortschaften in Frage.

Um geeignete Aufgabenbereiche für ungebundene Helfer festzulegen, wurde ein dreistufiges Verfahren eingesetzt. Stufe 1 beinhaltet eine Literaturrecherche zu Tätigkeiten, die Helfer verrichten können. In Stufe 2 wurde eine Befragung von Einsatzkräften durch das Projektteam durchgeführt, um Aufgaben zu ermitteln, die von ungebundenen Helfern übernommen werden können. In Stufe 3 wurden die identifizierten Aufgabenfelder in Zusammenarbeit mit der Stadtwehrlleitung verifiziert und festgelegt.

Organisatorisch werden die ungebundenen Helfer in einem Helferpool erfasst und registriert. Dieser entspricht einer einfach strukturierten Datenbank, in der alle wichtigen Informationen über die Helfer enthalten sind. Dazu zählen neben den Kontaktdaten auch vorhandene Kompetenzen, berufliche Qualifikationen, einsatzfähige Technik, etc. Aktiviert wird der Helferpool, wenn eine Großschadenslage vorliegt bzw. die ortsfeste Befehlsstelle in Betrieb genommen wird (siehe Abbildung 1). Dabei entscheidet die Einsatzleitung der FFW in Abstimmung mit der Stadtverwaltung, wann die ungebundenen Helfer alarmiert werden, um die Einsatzkräfte zu entlasten (Lehmann et al. 2019)

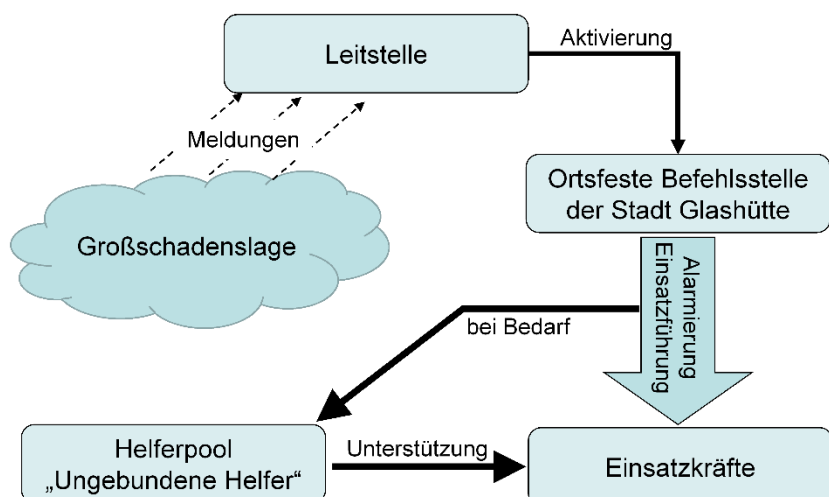


Abb. 1: Einsatzszenario ungebundene Helfer

Für den Aufbau des Helfer-

pools wurden und werden in den Ortsteilen Informationsveranstaltungen in Form von Hochwasserabenden zusammen mit der freiwilligen Feuerwehr durchgeführt. Neben dem gezielten Werben für die Tätigkeit als ungebundener Helfer, werden der Bevölkerung Informatio-

nen zur Gefährdung durch Starkregen und Hochwasser des Ortsteils sowie Hinweise zur Eigenvorsorge vermittelt. Weiterhin präsentiert die freiwillige Feuerwehr Technik zur Hochwasserabwehr und gibt ihrerseits Tipps z.B. zum Sandsackverbau. Aktuelle Veranstaltungshinweise können der Projekthomepage entnommen werden.

3.3 Aufbau eines lokalen Informationsnetzes

Das lokale Informationsnetz zielt auf eine langfristige Datengewinnung speziell von Informationen zu kleinräumigen Extremereignissen wie Starkregen und Sturzfluten und daraus erwachsende Überflutungen und Schäden. Dazu wurde im Rahmen des Projektes ein webbasiertes Hochwasser/Schaden-Erfassungstool entwickelt (siehe Abbildung 2). Das Tool richtet sich vor allem an die Bevölkerung, aber auch an Einsatzkräfte z.B. der Freiwilligen Feuerwehr, derartige Daten und Informationen systematisch und zielorientiert zu erfassen. Nach der Verortung der Information (z.B. Überflutung, Schadstelle, Messwert) in einer digitalen Karte werden Details hierzu mit einem einfachen Formular abgefragt und in einer Datenbank abgelegt. Zusätzlich können Fotos hochgeladen werden. Mit Hilfe der Bevölkerung sollen so Extremereignisse umfassend dokumentiert werden, um so

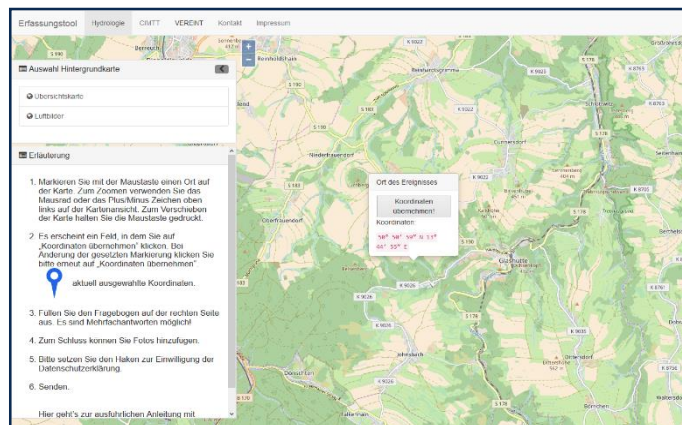


Abb. 2: Startseite des webbasierten Hochwasser/Schaden-Erfassungstools

einerseits die Wirksamkeit von Maßnahmen des Hochwasserschutzes und der Hochwasserabwehr zu prüfen, und andererseits mitzuhelfen eine Datenbasis zur Analyse des Klimawandeleinflusses auch unter kleinräumigen Bedingungen zu erarbeiten. Das Erfassungstool inklusive Kurzanleitung ist über die Projekthomepage <http://vereint.cimtt.de> zugänglich und besitzt einen Zugang zu Testzwecken für jedermann.

Ein weiterer Baustein des lokalen Informationsnetzes sind Messstationen des Niederschlags. Hiermit soll eine Verdichtung des bodennahen Niederschlagsmessnetzes erreicht werden, um die flächenhafte Niederschlagsschätzung mit dem Radar zuverlässiger validieren zu können und im Ereignisfall gebietspezifische Messdaten des Niederschlags für die Einsatzführung bereit zu stellen. Durch eine Kooperation mit dem Projekt EXTRUSO (EXTRUSO, 2019) wurden bereits einige lowcost-online-Messstationen für Niederschlag, Temperatur und Luftfeuchte bei interessierten Bürgern im Gemeindegebiet installiert. Diese Bürger sollen gleichzeitig als Wetterbeobachter fungieren und zusätzlich qualitative Informationen zum Unwetterverlauf bereitstellen.

4. Schlussfolgerungen

Der vorgestellte Ansatz zur Anpassung der Organisation von Hochwasserabwehr und Bewältigung im ländlichen Raum zielt auf eine Stärkung der meist freiwilligen Einsatzkräfte und bezieht lokale Akteure und die Bevölkerung mit ein. Durch eine retrospektive Gefährdungs-

analyse mittels Crowdsourcing zur Erschließung des lokal vorhandenen Wissens lassen sich gezielt Gefahrenhotspots ausweisen. Diese Ausweisung ermöglicht u.a. eine verbesserte Einsatzplanung und Einsatzführung zur Hochwasserabwehr und eine bedarfsgerechte Bevorratung und Stationierung geeigneter mobiler Schutzmaßnahmen. Die Ergebnisse der modellgestützten Reanalysen zeigen jedoch auch, wie kleinräumig Extremniederschläge und deren Auswirkungen sein können. Radarniederschläge liefern hier zwar guten Anhaltspunkte, sind allerdings nicht fehlerfrei. Mit dem Aufbau des lokalen Informationsnetzes soll hier einerseits eine Lücke in Bezug auf die Niederschlagsmessung geschlossen werden und andererseits Ereignisse strukturiert in ihrer Ausprägung und Auswirkung dokumentiert werden. Diese Datenbasis soll zukünftig helfen, die Wirksamkeit von Maßnahmen des Hochwasserschutzes und der Abwehr zu bewerten und weitere Anpassungen vorzunehmen.

Mit dem Aufbau des ‚Pools‘ der ungebundenen Helfer stehen der Einsatzleitung der Feuerwehr im Bedarfsfall zusätzliche Kräfte zur Verfügung. Diese ungebundenen Helfer können gezielt anhand ihrer Kompetenzen oder technischen Ausrüstung aktiviert werden, um so die Einsatzkräfte der Feuerwehr zu entlasten. Allerdings fallen dadurch mehr koordinierende Aufgaben für die Einsatzkräfte an. Das Zusammenspiel zwischen Einsatzkräften und ungebundenen Helfern muss durch wiederkehrende Übungsszenarien gefestigt werden. Dazu sind entsprechende Schulungskonzepte zu entwickeln.

Abschließend sei angemerkt, dass durch Einbeziehen der Bevölkerung in die Projektbearbeitung zusätzliche positive Nebeneffekte wie z.B. eine Stärkung der privaten Hochwasservorsorge (Eigenvorsorge) der Bevölkerung erzielt werden können, was wiederum zu einer Entlastung der Einsatzkräfte beiträgt.

Literatur

- Bernhofer, C., Matschullat, J. und Bobeth, A. 2011. Klimaprojektionen für die REGKLAM-Modellregion Dresden, Rhombos Verlag, Berlin.
- Brunner, G. 2016. HEC-RAS User's Manual CPD-68. Version 5.0.3.
- EXTRUSO, 2019. EXTRUSO: „Extremereignisse in kleinen und mittleren Einzugsgebieten - Neue Monitoring- und Vorhersagetechnologien zum kooperativen Risikomanagement“, <https://extruso.bu.tu-dresden.de/>, Zugriff am 14.02.2019.
- Grundmann, J., Schache, J., Lehmann, K., Röhm, P. 2018. VEREINT - Kooperativ organisierter Bevölkerungsschutz bei extremen Wetterlagen: Starkregen & Sturzfluten im ländlichen Raum am Beispiel der Stadt Glashütte, Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 40.18.
- Lehmann, K, Krause-Jüttler, G., Ott, G. 2019. Integration ungebundener Helfer in gefestigte Strukturen des Bevölkerungsschutzes, in: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e. V. (Hrsg.): Arbeit interdisziplinär analysieren – bewerten - gestalten, Dresden, Beitrag A.11.17.
- Schulla, J. 2017. Model Description WaSiM. Zürich.
- Stadt Glashütte (Hrsg.). 2018. Amtsblatt 12/2018, S. 2.
- Thielen, A. 2015. Das Hochwasser im Juni 2013: Bewährungsprobe für das Hochwasserrisikomanagement in Deutschland. [Hrsg.] Deutsches Komitee für Katastrophenvorsorge, Bonn, S. 207.

Zeitliche Organisation meteorologischer Eingangsdaten - Praxisbeispiele aus Glaziologie und urbaner Hydrologie in einem Open Source-Projekt

Kristian Förster, Siling Chen, Florian Hanzer

Zusammenfassung

Für eine Vielzahl hydrologischer Fragestellungen werden meteorologische Eingangsdaten mit einer hohen zeitlichen Auflösung (z.B. stündliche Auflösung oder feiner) benötigt. Häufig liegen diese hochaufgelösten Zeitreihen nur für vereinzelte Messstationen und dann auch nur für relativ kurze Zeiträume von zum Teil weniger als 20 Jahren vor. In diesem Beitrag wird das open-source-Projekt MELODIST (MEteoroLOGical observation time series DISaggregation Tool) vorgestellt. Es handelt sich dabei um ein in der Programmiersprache Python entwickeltes Software-Paket, welches Tagesdaten meteorologischer Größen zu Stundendaten und z.T. höheren Auflösungen disaggregiert. Anhand von Beispielen wird der Mehrwert für prozessbasierte hydrologische Modellierungen aufgezeigt.

1. Einleitung

Prozessbasierte hydrologische Modellierungen stellen hohe Anforderungen an die meteorologischen Eingangsdaten. Für viele Fragestellungen werden Stundendaten oder sogar feinere zeitliche Auflösungen erwartet. Für die Modellierung der Energiebilanz von Schnee oder Gletschereis werden wegen des ausgeprägten Tagesgangs zeitlich hochaufgelöste Zeitreihen von Temperatur, Luftfeuchte, Strahlung und Windgeschwindigkeit benötigt (Hanzer et al., 2018). Ein weiteres Beispiel ist die Modellierung von hydrologischen Systemen mit sehr kurzer Konzentrationszeit wie es z.B. bei der Planung von Kanalisationsnetzen der Fall ist. Hier sind insbesondere Niederschlagsdaten mit einer zeitlichen Auflösung von wenigen Minuten erforderlich.

Häufig liegen diese hochaufgelösten Zeitreihen für vereinzelte Messstationen und dann auch nur für relativ kurze Zeiträume von zum Teil weniger als 20 Jahren vor (Förster et al., 2016). In hydrologischen Fragestellungen ist hingegen oft eine robuste Aussage, die sich auf einen Zeitraum von mehreren Dekaden stützt, von hohem Interesse. Auf der anderen Seite existieren sehr lange Zeitreihen mit täglichen Beobachtungen, welche großes Potential für die Modellierung bieten können. Das open-source-Projekt MELODIST (MEteoroLOGical observation time series DISaggregation Tool) bietet eine Vielzahl von Ansätzen zur zeitlichen Disaggregation dieser Tagesdaten, um zeitlich hochaufgelöste Zeitreihen für die Modellierung zu erhalten (Förster et al., 2016). In diesem Beitrag wird die Software kurz vorgestellt und es werden Anwendungsbeispiele für prozessbasierte hydrologische Modellierungen aufgezeigt.

2. Methodik

MELODIST stellt Disaggregationsmethoden für die meteorologischen Größen Temperatur, Niederschlag, relative Feuchte, Globalstrahlung bzw. Sonnenscheindauer und Windgeschwindigkeit bereit. Das Modell baut dabei auf einer Vielzahl von Vorarbeiten zu diesem Thema auf (Waichler und Wigmosta, 2003; Debele et al., 2007; Bregaglio et al., 2010). Aus Platzgründen sei hier auf den Modellbeschreibungsartikel verwiesen (Förster et al., 2016). Zusammenfassend beschrieben kommen überwiegend deterministische bzw. statistische Ansätze zum Einsatz. Dabei wird die zeitliche Organisation der meteorologischen Größen im Tagesverlauf modelliert und es können durch Kalibrierung verbesserte Anpassungen erzielt

werden, sofern hochaufgelöste Beobachtungsdaten bereitstehen. Dieses Prinzip veranschaulicht die Abbildung 1 am Beispiel von Temperaturdaten. Für die Variable Niederschlag steht mit dem Kaskadenmodell ein stochastischer Ansatz zur Verfügung (Olsson, 1998; Güntner et al., 2001; Müller und Haberlandt, 2015). Dabei wird der Tageswert sukzessive, kaskadenartig halbiert, bis die gewünschte Auflösung erreicht ist. Wahrscheinlichkeiten für die Unterteilung auf die erste und zweite Hälfte werden anhand von Beobachtungsdaten geschätzt.

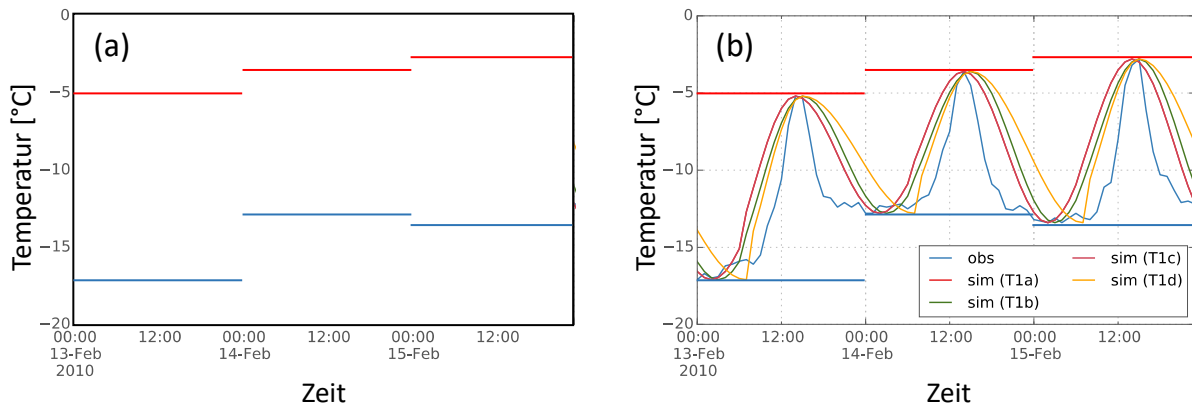


Abb. 1: Prinzip der Temperatur-Disaggregation. (a) Als Eingangsdaten stehen üblicherweise Minimum- und Maximumtemperatur zur Verfügung. (b) Damit können Tagesverläufe mit verschiedenen Methoden berechnet werden (Förster et al., 2016).

MELODIST bündelt die zuvor beschriebenen Methoden erstmalig in einem einheitlichen, frei zugänglichen open source-Softwarepaket vor. Die erste Version von MELODIST (0.1.0) wurde 2016 veröffentlicht. In der neuesten Version 0.1.3 von 2018 sind wichtige Praxiserfahrungen im Zusammenhang mit der Anwendung hydrologischer Modelle eingeflossen (Hanzer et al., 2018) und es wurde eine zeitliche Disaggregation mit dem Kaskadenmodell bis zu einer zeitlichen Auflösung von 5-Minuten realisiert. Dabei wird ein Tag sukzessive neun- bis elfmal halbiert, um zeitliche Auflösungen im Minutenbereich zu erhalten.

3. Anwendungsbeispiele

3.1 Berechnung von Überschwemmungen in der Stadthydrologie

Für die Ortslage Biebergemünd-Kassel (Hessen) wurde ein detailliertes hydrologisches Modell einschließlich des Kanalnetzes mit der open-source-Software SWMM (Rossman, 2010) aufgebaut. Es handelt sich um einen kleinen Ort mit ca. 2500 Einwohnern und die Entwässerung erfolgt durch ein Mischsystem. Das urbane Einzugsgebiet einschließlich land- und forstwirtschaftlich genutzter Außengebiete umfasst ca. 190 ha. Es wurden alle Kanäle und Schächte im Modell erfasst und entsprechenden Flächen (Parzellen) zugeordnet. Da keine Messungen vorlagen, konnte das Modell nur anhand einer durchschnittlichen Häufigkeit von Mischwasserentlastungen plausibilisiert werden, die durch das Gemeindepersonal bestätigt wurde.

Das Modell wurde zunächst mit Beobachtungsdaten der Station Wächtersbach betrieben. Anhand dieser zu Tageswerten aggregierten Niederschlagsdaten wurden synthetische 5-Minutenwerte generiert. Dabei wurden verschiedene maximale Disaggregationsebenen im Kaskadenmodell berücksichtigt. In der hydrologischen Simulation wurde das Überschwemmungsvolumen $V_{\bar{U}}$ betrachtet.

Die Abbildung 2 zeigt Q-Q-Diagramme der disaggregierten 5-Minuten-Intensitäten (a–c). Je nach Ebene (9 bedeutet, dass der Tageswert sukzessive 9x halbiert wird, sodass eine Auflösung von 2,8125 Minuten erreicht wird und durch Resampling auf 5 Minuten interpoliert wird) ergeben sich leichte

Abweichungen in den Quantilen (oberhalb von 99 %). Die 11. Ebene (0,7 Minuten) ist für die höchsten Werte am besten, wohingegen die 9. Ebene die kleineren Starkregen besser rekonstruiert. Die mit SWMM berechneten Verteilungen des Überschwemmungsvolumens (gezeigt jeweils als Boxplot) legt nahe, dass die synthetischen Niederschläge den Beobachtungswert (Summe der Überschwemmungen von 2012–2016) unterschätzen. Die beste Übereinstimmung ergibt sich für die Disaggregation bis zur 11. Ebene (0,7 Minuten und anschließendes Resampling auf 5 Minuten), wobei der Wert noch ca. 20–30 % unter der Referenz liegt. Die Ergebnisse legen nahe, dass noch weitere Untersuchungen notwendig sind. Längere Zeitreihen zur Kalibrierung (es lagen nur 8 Jahre vor) könnten hier ebenfalls zu einer Verbesserung führen.

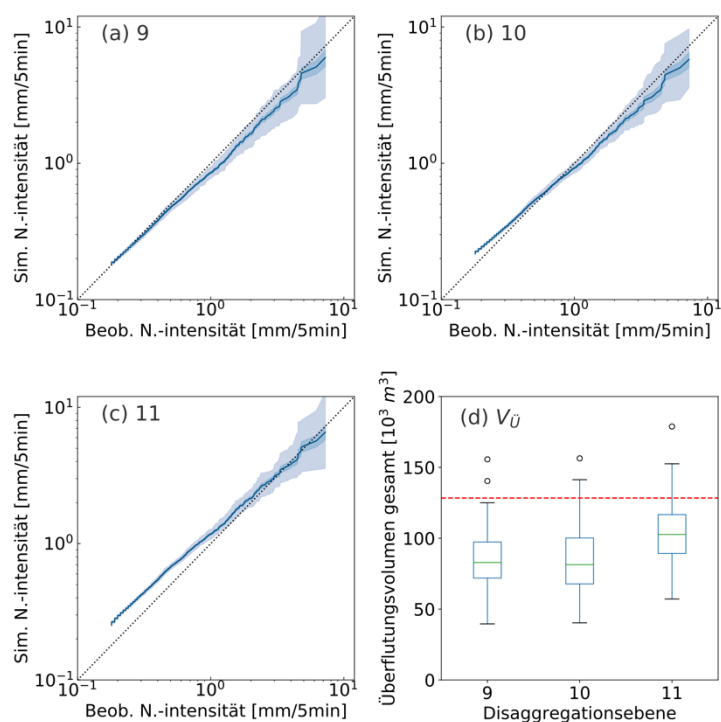


Abb. 2: (a–c) Stochastische Disaggregation von Niederschlag und (d) Simulation des Überschwemmungsvolumens für verschiedene maximale Disaggregationsebenen bei 100 Realisationen.

3.2 Berechnung der Energiebilanz von Schnee und Eis

Das hydroklimatologische Modell AMUNDSEN (Strasser, 2008) wurde für das Gebiet der Ötztaler Alpen (Tirol, Österreich) aufgesetzt, um Szenarien der klimawandelbedingten Veränderung der Schnee- und Eisressourcen sowie der Abflussregimes in den Kopfeinzugsgebieten zu berechnen. Das 558 km² große Untersuchungsgebiet erstreckt sich von 1760 bis 3770 m ü.A. und ist zu ca. 24 % vergletschert. AMUNDSEN benötigt zur Auflösung des Tagesgangs der Energiebilanz von Schnee- und Eisoberflächen stündliche bis dreistündliche meteorologische Eingangsdaten; die verwendeten EURO-CORDEX-Klimaszenariendaten

standen jedoch nur in täglicher Auflösung zur Verfügung, weshalb eine Disaggregation auf 3-Stunden-Schritte notwendig wurde.

Um die grundsätzliche Anwendbarkeit des Modellsetups für Szenariosimulationen zu prüfen bzw. den Einfluss der Disaggregation auf die hydrologischen Modellausgabegrößen zu quantifizieren, wurden zwei Modellläufe für den historischen Zeitraum 1997–2013 gerechnet: ein Lauf angetrieben mit 3-stündlichen Beobachtungsdaten und ein Lauf, bei dem dieselben Daten zunächst auf Tagesdaten aggregiert und anschließend wieder auf 3-Stunden-Daten disaggregiert wurden (für Details zur Methodik siehe Hanzer et al., 2018). Für die Validierung der Modellergebnisse stand eine große Zahl an Beobachtungsdaten zur Verfügung (Hanzer et al., 2016): (i) langjährige Gebietsniederschlagswerte für einzelne Teileinzugsgebiete, (ii) Punktmessungen der Schneehöhe für einzelne Stationen, (iii) Abflussmessreihen für verschiedene Teileinzugsgebiete, (iv-v) Schneebedeckungsdaten aus MODIS- und Landsat-Satellitenprodukten, (vi-vii) langjährige glaziologische bzw. geodätische Gletschermassenbilanzen und (viii) hochaufgelöste räumlich verteilte Schneehöhendaten aus einer Airborne-Laserscanning-Kampagne. Das Ergebnis dieser Validierung ist in Abbildung 3 dargestellt. Auf die gewählten Gütekriterien sei hier nicht genauer eingegangen (für Details siehe Hanzer et al., 2016); die Achsen in Abbildung 3 sind jedoch so orientiert, dass die Modellgüte jeweils von unten nach oben zunimmt. Dabei ist zu sehen, dass die Disaggregation sich größtenteils leicht negativ auf die Modellgüte auswirkt, trotzdem aber immer noch ein sehr zufriedenstellendes Modellergebnis erreicht wird und keine systematischen Modellabweichungen erkennbar sind. Zu bemerken ist allerdings, dass die Modellgüte eine hohe Sensitivität gegenüber der Wahl der Disaggregationemethode für die einzelnen Variablen zeigte. Darüber hinaus erwies sich die Kalibrierung der Methoden mittels hochaufgelöster Beobachtungszeitreihen, insbesondere für die Globalstrahlung (als der bestimmende Faktor für die Schnee- und Eisschmelze), als essentiell.

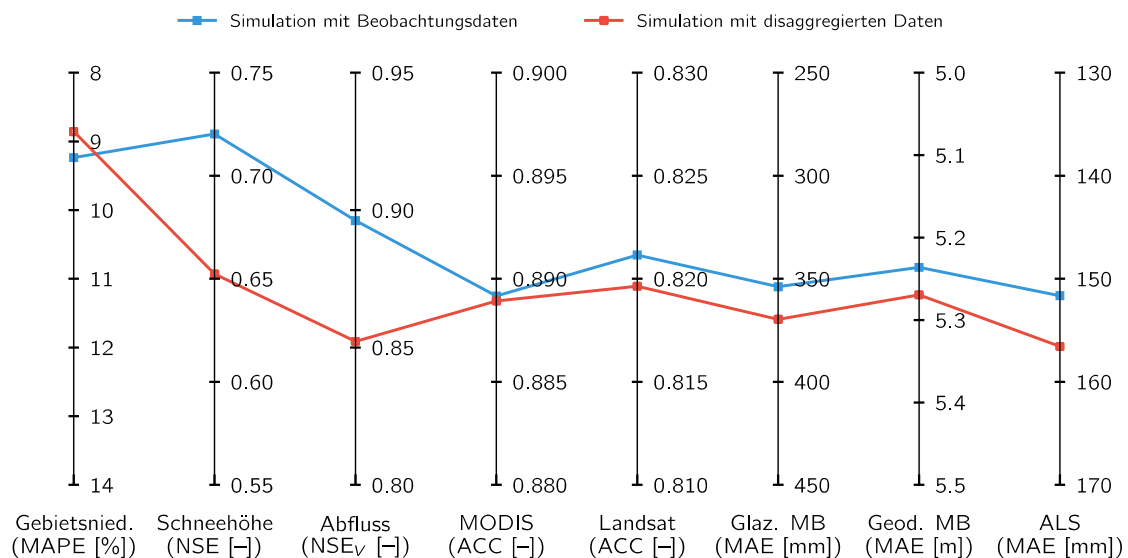


Abb. 3: Vergleich der Modellgüte für AMUNDSEN-Simulationen angetrieben mit Beobachtungsdaten (blaue Linie) sowie mit aggregierten und wieder disaggregierten Beobachtungsdaten (rote Linie).

4. Schlussfolgerung und Ausblick

Die unterschiedlichen Anwendungen aus den Bereichen Stadt- und Hochgebirgshydrologie zeigen, dass MELODIST in der Lage ist, adäquate hochaufgelöste Eingangsdaten für verschiedenste Prozessmodellierungen auf Basis geringer aufgelöster Tagesdaten bereitzustellen. MELODIST ist ein open source-Projekt und kann von allen Interessierten genutzt und weiterentwickelt werden (<https://github.com/kristianfoerster/melodist>). Das Entwicklungsteam freut sich über Hinweise und Feedback.

Literatur

- Bregaglio, S., Donatelli, M., Confalonieri, R., Acutis, M., Orlandini, S., 2010. An integrated evaluation of thirteen modelling solutions for the generation of hourly values of air relative humidity. *Theor Appl Climatol* 102, 429–438. <https://doi.org/10.1007/s00704-010-0274-y>
- Debele, B., Srinivasan, R., Yves Parlange, J., 2007. Accuracy evaluation of weather data generation and disaggregation methods at finer timescales. *Adv. Water Resour.* 30, 1286–1300. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2006.11.009>
- Förster, K., Hanzer, F., Winter, B., Marke, T., Strasser, U., 2016. An open-source MEteoro-LOGical observation time series DISaggregation Tool (MELODIST v0.1.1). *Geosci. Model Dev.* 9, 2315–2333. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-2315-2016>
- Güntner, A., Olsson, J., Calver, A., Gannon, B., 2001. Cascade-based disaggregation of continuous rainfall time series: the influence of climate. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 5, 145–164. <https://doi.org/10.5194/hess-5-145-2001>
- Hanzer, F., Förster, K., Nemeč, J., Strasser, U., 2018. Projected cryospheric and hydrological impacts of 21st century climate change in the Ötztal Alps (Austria) simulated using a physically based approach. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 22, 1593–1614. <https://doi.org/10.5194/hess-22-1593-2018>
- Hanzer, F., Helfricht, K., Marke, T., Strasser, U., 2016. Multilevel spatiotemporal validation of snow/ice mass balance and runoff modeling in glacierized catchments. *The Cryosphere* 10, 1859–1881. <https://doi.org/10.5194/tc-10-1859-2016>
- Müller, H., Haberlandt, U., 2015. Temporal Rainfall Disaggregation with a Cascade Model: From Single-Station Disaggregation to Spatial Rainfall. *J. Hydrol. Eng.* 4015026. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001195](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001195)
- Olsson, J., 1998. Evaluation of a scaling cascade model for temporal rainfall disaggregation. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2, 19–30. <https://doi.org/10.5194/hess-2-19-1998>
- Rossmann, L.A., 2010. Storm water management model user's manual, version 5.0. National Risk Management Research Laboratory, US EPA.
- Strasser, U., 2008. Die Modellierung der Gebirgsschneedecke im Nationalpark Berchtesgaden, Forschungsberichte Nr. 55. Nationalparkverwaltung Berchtesgaden, Berchtesgaden.
- Waichler, S.R., Wigmosta, M.S., 2003. Development of Hourly Meteorological Values From Daily Data and Significance to Hydrological Modeling at H. J. Andrews Experimental Forest. *J. Hydrometeorol* 4, 251–263. [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2003\)4<251:DOHMFV>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2003)4<251:DOHMFV>2.0.CO;2)

Der Einfluss dynamischer Bestandesparameter auf die Simulationsgüte von Interzeptionsmodellen für Buchenbestände

Bernd Ahrends, Markus Wagner, Birte Scheler, Henning Meesenburg

Zusammenfassung

An acht Buchenbeständen in Nordwestdeutschland wurden lange Zeitreihen (insgesamt 181 Messjahre) von gemessenen Bestandesniederschlägen mit Hilfe eines Interzeptionsmodells abgebildet. Hierfür wurden in einer Modellvariante die Bestandesparameter mit allometrischen Schätzfunktionen rekonstruiert und in einer zweiten Variante über den Simulationszeitraum konstant gehalten. Obwohl es sich bei den untersuchten Wäldern um alte Bestände mit i.d.R. nur geringfügigen Eingriffen in den letzten Jahrzehnten handelt, zeigt sich für die dynamische Variante eine deutlich verbesserte Modellperformanz ($E_1 = 0,71$) im Vergleich zur statischen Variante ($E_1 = 0,60$). Diese Ergebnisse weisen auf einen deutlichen Informationsgewinn und eine verbesserte Simulationsgüte von Wasserhaushaltsmodellen bei Langzeitstudien hin, wenn die zeitliche Dynamik von Bestandesparametern berücksichtigt wird.

1. Einleitung

Die Niederschlagsinterzeption ist eine bedeutende Komponente des Wasserkreislaufs in Wäldern und bestimmt deshalb maßgeblich die Grundwasserneubildung und die Wasserverfügbarkeit für Waldbestände. Gleichzeitig ist die Interzeption bzw. der Bestandesniederschlag eine der wenigen direkt messbaren Komponenten des Wasserhaushalts von Waldökosystemen und eignet sich daher für die Kalibrierung und Validierung von hydrologischen Modellen. Die Höhe der Interzeption ist von klimatischen Bedingungen sowie vom Typ und der Struktur der Vegetationsbedeckung abhängig. Dabei haben baumartenspezifische Parameter wie Bestandesbiomasse, -dichte und -höhe sowie der Blatt- (LAI) und Stammflächenindex (SAI), welche die temporäre Wasserspeicherkapazität des Bestandes beschreiben, einen maßgeblichen Einfluss auf die Interzeptionsverluste. Ausreichend lange Zeitreihen zur Kalibrierung und Validierung von bestandesspezifischen Interzeptionsmodellen für Waldökosysteme sind in Deutschland und in Europa vorwiegend für Intensivmonitoringflächen des Level II-Programmes (ICP Forests) verfügbar. Mit dem Blattflächenindex (LAI) liegt ein sensibler Parameter für die Berechnung von Interzeptionsverlusten jedoch häufig nur in Form von kurzen oder methodisch inhomogenen Zeitreihen vor. Demgegenüber liegen hochaufgelöste Messungen der Freiland- und Bestandesniederschläge häufig für wesentlich längere Zeiträume (10 bis 30 Jahre) vor. Eine Möglichkeit der Rekonstruktion des LAI von Laubbaumbeständen ergibt sich über die spezifische Blattfläche (SLA) und die Abschätzung der Blattmasse mit Hilfe von allometrischen Funktionen. Entsprechend lassen sich für die Interzeptionsmodellierung daher folgende Ziele ableiten: (1) Beschreibung der Möglichkeiten und Grenzen der dynamischen Rekonstruktion von Bestandesparametern (LAI, SAI, Bestandeshöhe) für eine verbesserte Modellkalibrierung und -validierung am Beispiel von Buchen-Intensivmonitoringflächen aus Nordwestdeutschland. (2) Abschätzung des Informationsgewinns einer Berücksichtigung der zeitlichen Dynamik von Bestandesparametern auf die Simulationsgüte von Wasserhaushaltsmodellen.

2. Material und Methoden

2.1 Begriffe, Definitionen und Untersuchungsbestände

Der Interzeptionsverlust kann anhand der folgenden Gleichung berechnet werden:

$$I = FN - (KT + ST) = FN - BN$$

wobei I, FN, KT, ST, BN für Interzeption, Freilandniederschlag, Kronentraufe, Stammabfluss und Bestandesniederschlag stehen. Die Kronentraufe schließt sowohl den Anteil des Niederschlages ein, der von den Blättern zum Boden tropft, als auch den Niederschlag, der direkt durch die Kronen fällt. Datensätze aus insgesamt 181 Messjahren von sechs Buchenreinbeständen und zwei Buchen-Eichen-Mischbeständen in Nordwestdeutschland (Schleswig-Holstein, Niedersachsen, Hessen) wurden für diese Studie ausgewählt. Das Bestandesalter variiert zwischen 47 und 172 Jahren, das Bestandesvolumen zwischen 264 und 644 m³ ha⁻¹. Die Bestände liegen zwischen 48 und 503 m ü. NN und die langjährige Jahresdurchschnittstemperatur (1981 bis 2010) variiert zwischen 7,2 und 8,9 °C.

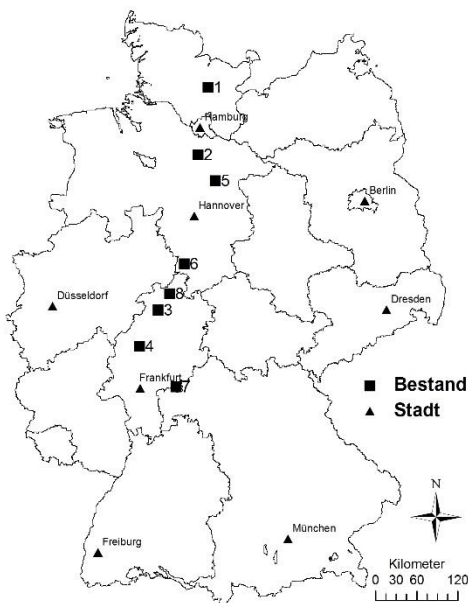


Abb. 1: Geographische Lage der berücksichtigten Intensivmonitoringflächen mit Buchenbestockung in Nordwestdeutschland.

2.2 Interzeptionsmodell

Um die Höhe der Interzeption und damit den Bestandesniederschlag in Abhängigkeit von unterschiedlichen klimatischen Bedingungen und Eigenschaften der Vegetation abzuschätzen, sind zahlreiche empirische, physikalisch basierte oder stochastische Modelle entwickelt worden (Liu 1997). Die Modelle von Rutter et al. (1972) und Gash (1979) sind die gebräuchlichsten prozessorientierten Interzeptionsmodelle und wurden entsprechend in zahlreichen Versionen in Wasserhaushaltsmodelle implementiert. Ein in Deutschland häufig für forsthydrologische Fragestellungen eingesetztes Wasserhaushaltsmodell ist Brook90 (Thiele et al. 2017; Panferov et al. 2009; Ahrends et al. 2010), welches zur Beschreibung der Interzeption eine vereinfachte Version des Rutter-Modells verwendet.

2.3 Modellparametrisierung und Bewertung der Modellgüte

Angetrieben wurde das Interzeptionsmodell mit Hilfe von auf die Untersuchungsbestände regionalisierten DWD-Klimadaten (Niederschlag, Minimaltemperatur, Maximaltemperatur, Dampfdruck, Windgeschwindigkeit, Sonnenscheindauer) in täglicher Auflösung. Für die Regionalisierung wurden geostatistische Methoden und generalisierte additive Modelle (GAMs) verwendet (Ahrends et al. 2018). Auf den Flächen mit langjährigen Messungen des Freilandniederschlages wurden die regionalisierten Niederschlagsdaten nach einer Biaskorrektur zur Lückenfüllung (Piani et al. 2010) verwendet. Der Bestandesniederschlag wurde pro Bestand mit mindestens 15 ständig offenen Niederschlagssammlern, bestehend aus jeweils einem Trichter als Auffangfläche und einer Sammelflasche, gewonnen. Stammabfluss wurde mittels um den Stamm angebrachten Manschetten gewonnen, über die das Stammablaufwasser in Sammelgefäße geleitet wurde. Die Mengenerfassung erfolgte über geeichte Messbehälter, Kippschalenzähler oder geeichte Wasseruhren. Die Abflussmengen der einzelnen meist 14-tägigen Sammelperioden wurden jeweils zu Jahresflüssen aggregiert.

Zur Beschreibung der Bestandesstruktur wurden der Durchmesser des Kreisflächenmittelstammes, die Höhe des Kreisflächenmittelstammes sowie die Bestandesdichte verwendet. Diese Parameter wurden mit Hilfe von regelmäßig wiederholten standardisierten Bestandesaufnahmen erhoben (Dobbertin & Neumann 2016). Bei der dynamischen Modellvariante wurden die sich verändernden Bestandeseigenschaften berücksichtigt. Bei der statischen Variante wurde ausschließlich mit den Parametern der zuletzt durchgeführten Bestandesinventur gerechnet. Die Bestandesparameter Blattflächen- (LAI) und Stammflächenindex (SAI) zur Bestimmung des Interzeptionsspeichers wurden mit Hilfe von allometrischen Funktionen (Wutzler et al. 2008, Weis et al. 2012) abgeleitet, wobei als wichtige Eingangsgröße die spezifischen Blattflächen für jeden Bestand aus der Blattstreu ermittelt wurden (Fleck et al. 2016). Auf diese Weise konnten ausreichend lange LAI- und SAI-Zeitreihen rekonstruiert werden.

Tab. 1: Mathematische Definition der verwendeten Gütemaße (RMSE = mittlerer Quadratwurzelfehler; MAE = mittlerer absoluter Fehler; MBE: mittlerer Bias Fehler; E_1 : Modelleffizienz nach Legates & McCabe 2013; in Anlehnung an Li 2017; R^2 = Bestimmtheitsmaß).

Gütemaße	Definition	Gütemaße	Definition
RMSE	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$	E_1	$\left(1 - \frac{\sum_1^n (y_i - \hat{y}_i)}{\sum_1^n (y_i - \bar{y})}\right) 100(\%)$
MAE	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i - \hat{y}_i $	R^2	$\left(\frac{\sum_1^n (y_i - \bar{y})(\hat{y}_i - \widehat{\bar{y}}_i)}{\left(\sum_1^n (y_i - \bar{y})^2 (\hat{y}_i - \widehat{\bar{y}}_i)^2\right)^{1/2}}\right)^2$
MBE	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)$		

n: Anzahl der Messungen; y_i : Messwert; \hat{y}_i : Schätzwert; \bar{y} : Mittel der Messwerte; und $\widehat{\bar{y}}_i$: Mittel der Schätzwerte

Für alle übrigen Modellparameter wurde auf Standardwerte aus der Literatur (Federer et al. 2003, Thiele et al. 2017) und der Datenbank von LWF-Brook90 (Hammel & Kennel 2001) zurückgegriffen. Die Bewertung der Modellergebnisse erfolgte auf der Grundlage von Jahresraten des Bestandesniederschlags anhand der in Tab. 1 zusammengestellten Gütemaße.

3. Ergebnisse und Diskussion

Die rekonstruierte Entwicklung der Bestandesparameter LAI und SAI wird beispielhaft für zwei Untersuchungsbestände gezeigt (Abb. 2). Während Bestand 5 durch einen kontinuierlichen Anstieg von LAI und SAI gekennzeichnet ist, zeigt sich für Bestand 7 das wiederholte Absinken dieser beiden Parameter nach forstlichen Nutzungen mit nachfolgendem kontinuierlichem Anstieg bis zur nächsten Nutzung. Eine ausschließliche Verwendung der letzten Inventur für die gesamte Simulationsperiode dürfte in einzelnen Jahren zu erheblichen Abweichungen führen.

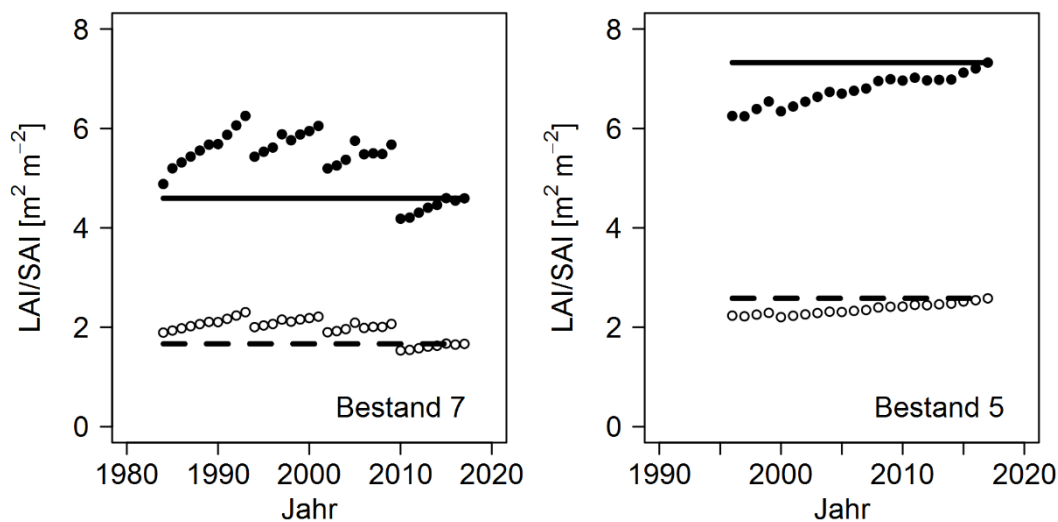


Abb. 2: Dynamik des Blatt- (LAI) bzw. Rindenflächenindex (SAI) in zwei Untersuchungsbeständen (5;7). ●: dynamischer LAI; ○: dynamischer SAI; —: konstanter LAI; - -: konstanter SAI.

Die Bedeutung von zeitlich höher aufgelösten Bestandeseigenschaften für die Simulation von Bestandesniederschlägen zeigt der Vergleich zwischen dynamischer und statischer Variante (Abb. 3, Tabelle 2). Neben einem höheren RMSE, MAE und Bias bei der statischen Variante ergibt sich insbesondere ein erheblicher Abfall der Modellgüte (E_1 -Wert).

Tab. 2: Modellgütekriterien (n. Tab. 1) für die Vorhersage der Bestandesniederschläge für Buchenbestände in NW-Deutschland.

Variante	RMSE	MAE	MBE	R ²	E ₁
	mm	mm	mm	-	-
dynamisch	61,2	45,9	0,1	0,91	0,71
statisch	78,8	63,6	-22,6	0,88	0,60

Entsprechend kann unterstellt werden, dass die deutlich höhere Modellperformanz und somit die verbesserte Abschätzung von Bestandesniederschlägen einen erheblichen Einfluss auf die weitere Kalibrierung und Validierung von Wasserhaushaltsmodellen haben kann. Der dargestellte absolute Modellfehler erklärt sich zu einem großen Teil aus den messtechnischen und methodischen Unsicherheiten bei der Messung von Bestandesniederschlägen (vgl. Puckett et al. 1991, Zimmermann & Zimmermann 2014) und der Messung und/oder Regionalisierung von Freilandniederschlägen (Sieck et al. 2007, Ahrends et al. 2018). Diese Unsicherheiten sind in Abb. 3 durch einen angenommenen 20 %igen Fehlerbereich gekennzeichnet.

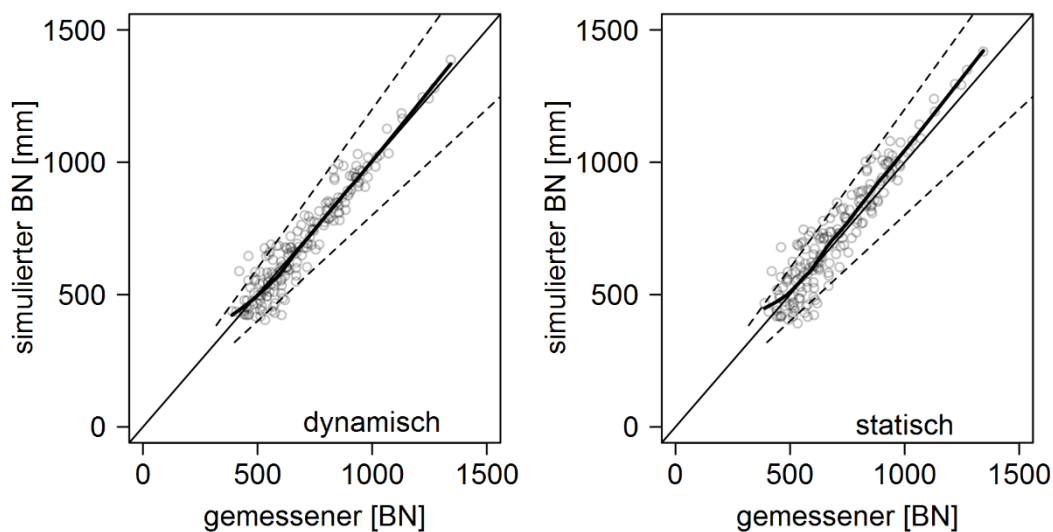


Abb. 3: Beziehung zwischen geschätztem und gemessenem jährlichem Bestandesniederschlag von acht Buchenbeständen in NW-Deutschland bei dynamischer (links) und statischer (rechts) Parametrisierung der Bestandesparameter. - -: 20 %iger Fehlerbereich; —: LOESS-Ausgleichskurve.

4. Schlussfolgerungen

Die dynamische Rekonstruktion von für die Wasserhaushaltssimulation wichtigen Bestandesparametern (LAI, SAI) führt zu deutlich verbesserten Gütemaßen beim Vergleich mit gemessenen Bestandesniederschlägen. Damit dürften sich durch die Berücksichtigung der zeitlichen Dynamik von Bestandesparametern bei der Kalibrierung und –validierung von Wasserhaushaltsmodellen erhebliche Vorteile ergeben. Diese kann durch die Anwendung von LAI- bzw. SAI-Schätzmodellen unter Verwendung der spezifischen Blattfläche hinreichend genau abgebildet werden. Insbesondere für forsthydrologische Fragestellungen (u.a. Baumartenwechsel, Durchforstungsintensitäten, Umtriebszeiten, usw.) ist es wichtig, dass Faktoren, die durch forstliche Maßnahmen beeinflusst werden, adäquat im Modell berücksichtigt werden.

Danksagung

Die Autoren danken der Europäischen Union für Förderung des LIFE+-Projekts FUTMON “Further development and implementation of an EU-level forest monitoring system” und dem

Waldklimafonds für die Förderung des Projektes WHH-KW "Standortsfaktor Wasserhaushalt im Klimawandel" (22WK-414102).

Literatur

- Ahrends, B., C. Penne, O. Panferov, 2010. Impact of target diameter harvesting on spatial and temporal pattern of drought risk in forest ecosystems under climate change conditions. *The Open Geography Journal* 3, 91-102.
- Ahrends, B., P. Schmidt-Walter, S. Fleck, M. Köhler, W. Weis, 2018. Wasserhaushaltssimulationen und Klimadaten. *Freiburger Forstliche Forschung* 101, 74-94.
- Dobbertin, M., M. Neumann, 2016. Part V: Tree Growth. In: UNECE ICP Forests Programme Coordinating Centre (ed.): Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. Thünen Institute of Forest Ecosystems, Eberswalde, Germany, 17 S.
- Federer, C. A., C. Vörösmarty B. Feketa, 2003. Sensitivity of annual evaporation to soil and root properties in two models of contrasting complexity. *J. Hydrometeorol.* 4, 1276-1290.
- Fleck, S., S. Raspe, M. Cater, P. et al., 2016. Part XVII: Leaf Area Measurements. In: UNECE ICP Forests Programme Coordinating Centre (ed.): Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. Thünen Institute of Forest Ecosystems, Eberswalde, Germany, 44 S.
- Gash, J. H. C., 1979. An analytical model of rainfall interception by forests. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 105, 43-55.
- Hammel, K., M. Kennel, 2001. Charakterisierung und Analyse der Wasserverfügbarkeit und des Wasserhaushalts von Waldstandorten in Bayern mit dem Simulationsmodell BROOK90. *Forst. Forschungsberichte München*, 185. Heinrich Frank. München. 148 S.
- Legates, D. R., G. J. McCabe, 2013. A refined index of model performance: a rejoinder. *Int. J. Climatol.* 33, 1053-1056.
- Li, J., 2017. Assessing the accuracy of predictive models PLoS ONE, 12, (8): e0183250.
- Liu, S., 1997. A new model for the prediction of rainfall interception in forest canopies. *Ecol. Model.* 99, 151-159.
- Panferov, O., C. Doering, E. Rauch, A. Sogachev, B. Ahrends, 2009. Feedbacks of windthrow for Norway spruce and Scots pine stands under changing climate. *Environ. Res. Lett.* 4, (doi:10.1088/1748-9326/4/4/045019).
- Piani, C., J. O. Haerter, E. Coppola, 2010. Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe. *Theor Appl Climatol* 99, 187-192.
- Puckett, K. J., 1991. Spatial variability and collector requirements for sampling throughfall volume and chemistry under a mixed hardwood canopy. *Can. J. For. Res.* 21, 1581-1588.
- Rutter, A. J., K. A. Kershaw, P. C. Robins, A. J. Morton, 1972: A predictive model of rainfall interception in forests. I. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine. *Agric. Meteorol.* 9, 367-384.
- Sieck, L. C., S. J. Burges M. Steiner, 2007. Challenges in obtaining reliable measurements of point rainfall. *Water Resour. Res.* 43, W01420.

- Thiele, J. C., R. Nuske, B. Ahrends, O. Panferov, M. Albert, K. Staupendahl, U. Junghans, M. Jansen, J. Saborowski, 2017. Climate change impact assessment—A simulation experiment with Norway spruce for a forest district in Central Europe. *Ecol. Model.* 346, 30-47.
- Weis, W., C. Hertel, A. Wagner, S. Raspe, 2012. Abschlussbericht ST241 - Verbesserung der Wasserhaushaltsmodellierung mit Daten des forstlichen Umweltmonitorings im Projekt FUTMON (LIFE+). 25 S.
- Wutzler, T., C. Wirth, J. Schumacher, 2008. Generic biomass functions for Common beech (*Fagus sylvatica*) in Central Europe: predictions and components of uncertainty. *Can. J. For. Res.* 38, 1661-1675.
- Zimmermann, A., B. Zimmermann, 2014. Requirements for throughfall monitoring: The roles of temporal scale and canopy complexity. *Agric. For. Meteorol.* 189-190, 125-139.

Grundwasserspiegel, -volums- und Versickerungsberechnungen im österreichischen hydrographischen Dienst

Gabriele Fuchs, Thomas Hoerhan

Zusammenfassung

In jahrelanger Zusammenarbeit zwischen dem hydrographischen Dienst und den stets gleichen Softwarefirmen wurden optimierte Modulpakete zur Haltung und Auswertung der Grundwasserstands- und Bodenwasser (Wassergehalt, Saugspannung, Temperatur und Versickerung) -Daten entwickelt. Aus rund 5000 Grundwassermessstellen in 240 Grundwassergebieten zuzüglich eines Dutzend tiefengestufter Bodenwassermessstellen werden Versickerungen, Stichtags-, Differenzen-, statistische HGW- und NGW-Pläne, attraktiven Imagemaps aus Rastermanipulationen unter Einbeziehung eines digitalen Höhenmodells, Stauer- und Porositätsraster und Rasterdifferenzenzeitreihen berechnet. Der direkte Zugriff auf die Stamm- und Zeitreihendaten erfolgt entweder über eine Makrosprache namens AZUR® oder über eine Windows-Anwendung namens GW-TOOLS®.

1. Die Gebietskulisse und GIS-Software

2017 erfolgte für das GIS-Prä- und Postprocessing der Umstieg von ARC-INFO auf QGIS – ausgelöst durch das Erfordernis einer praktikablen Hotkey-Funktion zur Darstellung von Zeitreihendiagrammen bei Click auf die Messstelle. Aktuell wird an der Gestaltung der 3dimensionalen Qgis2threejs-Exporte zum Vergleich der punktuellen (Bohrprofile an den Messstellen) mit den gerasterten Porositäten und zur Modellierung von undurchlässigen Deckschichten gearbeitet.

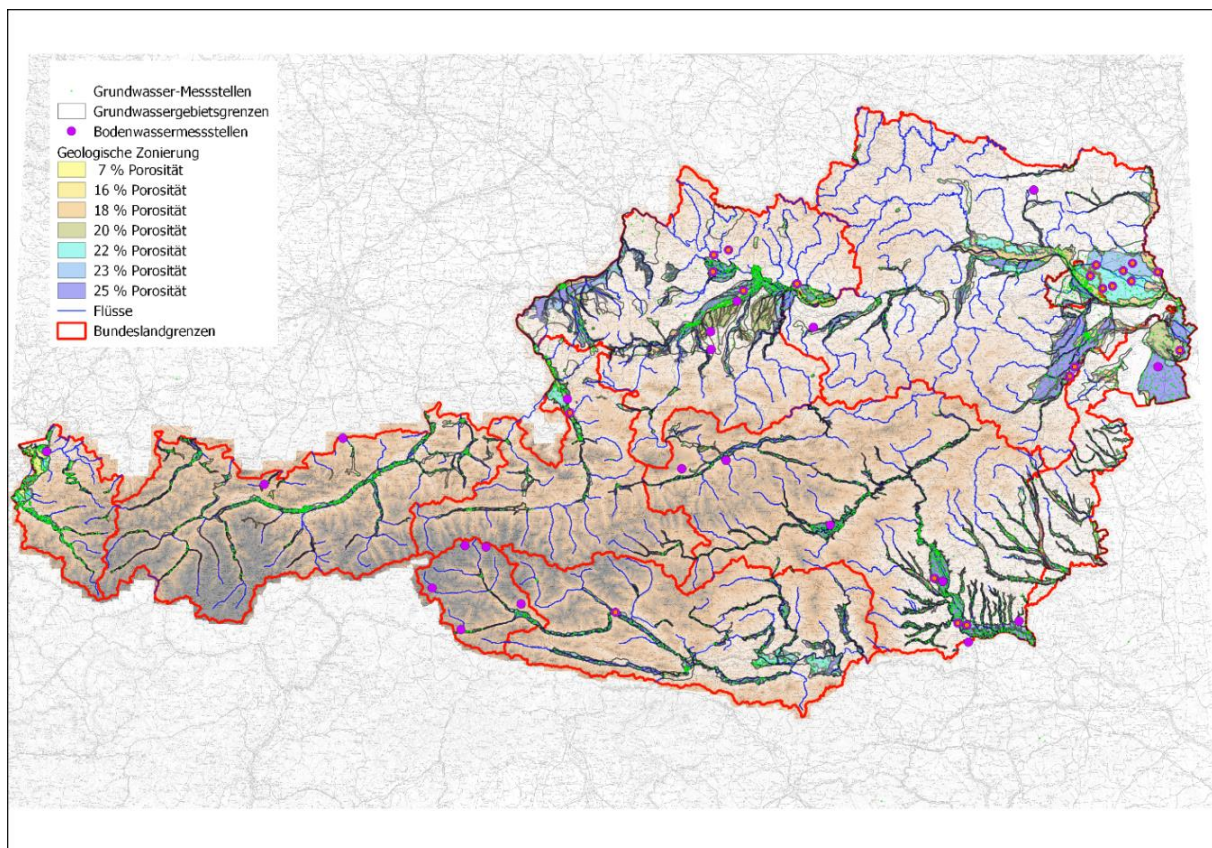


Abb. 1: Das hydrographische Grund- und Bodenwassermessnetz in Österreich

2. AZUR-Programme für Volums- und Versickerungsberechnungen

2.1 Berechnung aus dem Grundwasserstand - Einzelmessstelle

Die Änderung des Grundwasserspiegels in mm entspricht der Änderung des Grundwasservolumens in einer Grundwasserleitersäule von 1 m² Grundfläche in l, wenn der Wert mit der dränbaren Porosität multipliziert wird. In einem ersten Schritt wurde im AZUR-Programm FUGWN von regionalisierten, über die Tiefe konstanten Porositäten ausgegangen. Diese wurden über Lithologieregionalisierungen der Geologischen Bundesanstalt gewonnen und sind in Abb. 1 dargestellt – in den breiteren, weniger dicht gemessenen Grundwassergebieten des Ostens besser erkennbar. Die Volumsbewegungen wurden in An- und Abstiege unterteilt. Die Anstiege entsprechen in Vorfluter fernen Messstellen den vom Niederschlag verursachten Versickerungen, wenn die Trockenwetterauslaufkurve addiert wird. Diese wird aus dem Absinken des Grundwassers in Zeiten ohne Niederschlag gewonnen.

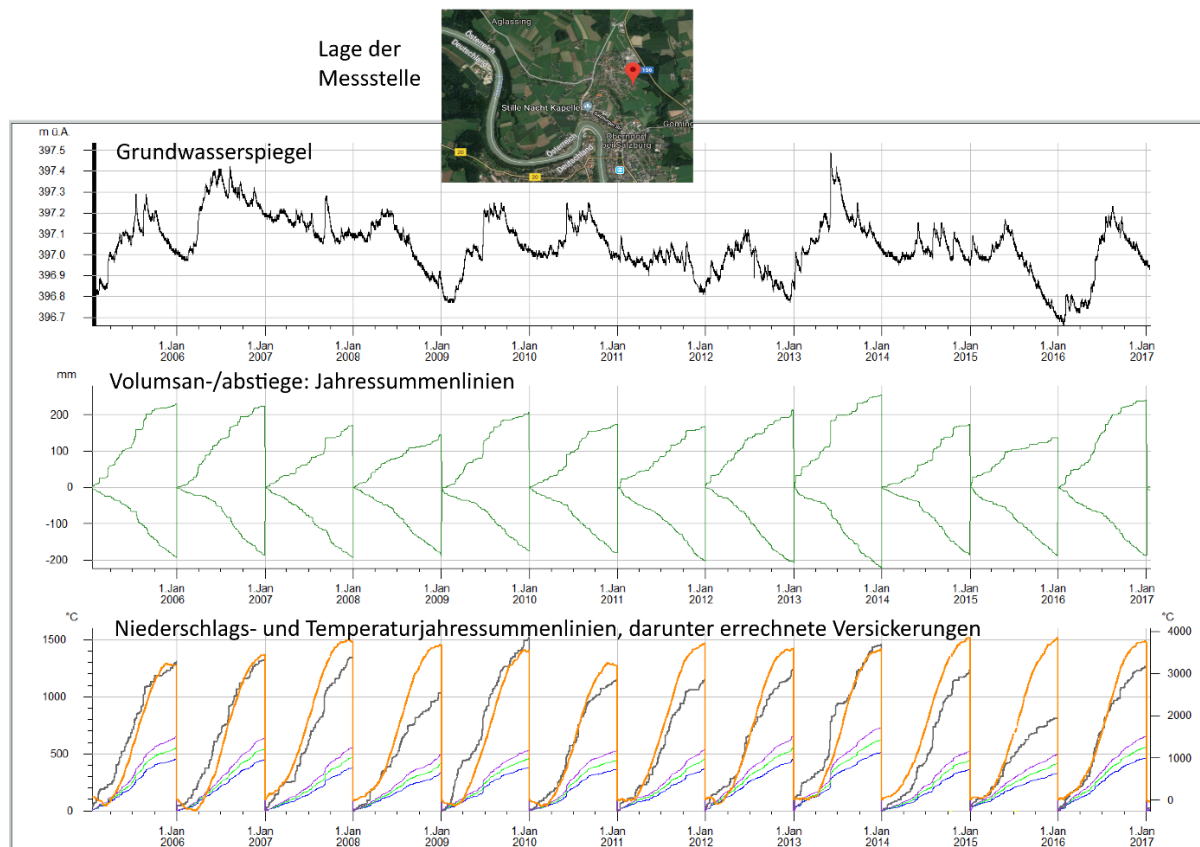


Abb. 2: Zeitreihen von Grundwasserspiegel, Volumsänderungen, ermittelten Versickerungen

Im untersten Diagramm der Abbildung 2 – es wird eine Salzburger Messstelle nordöstlich vom Oberndorfer Salzachknie gezeigt – werden die ermittelten Versickerungen, welche sich durch Parametrisierungen der Trockenwetterauslaufkurve unterscheiden, gemeinsam mit den Jahresniederschlags(schwarz)- und Temperatur(orange)summenlinien dargestellt.

Aktuell wird an der Implementierung tiefenveränderlicher Porositäten sowie an der Homogenisierung der Zeitreihen beim Übergang von wöchentlicher Handmessung zu stündlichen Datensammleraufzeichnungen gearbeitet.

2.2 Berechnungen und Messungen von Bodenwassermessstellen

Aus den 4 Lysimetern des hydrographischen Dienstes zuzüglich 10-20 Lysimetern anderer Betreiber wird die Versickerung über Wippen oder das Sickerwasservolumen/-gewicht erfasst (Abb. 3), aus den weiteren Messstellen mit tiefengestrufter Wassergehalts-/Saugspannungsaufzeichnung über $k_u \cdot i$ -Berechnungen und/oder Bodenwasserhaushaltsmodellierungen (SIMWASER).

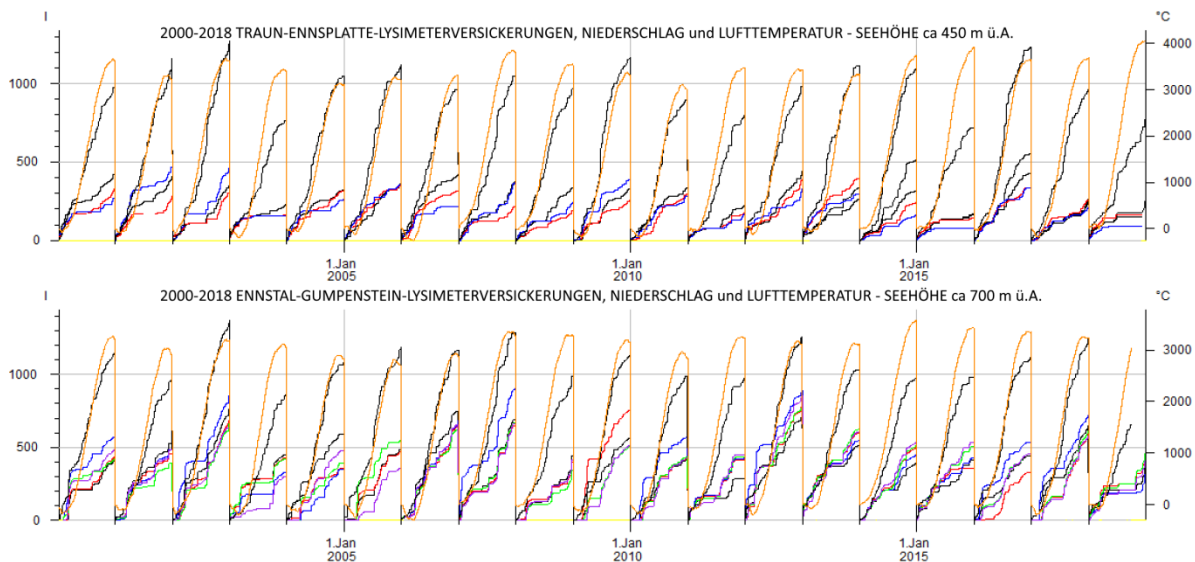


Abb. 3: Zeitreihen von Lysimeterversickerungen, Niederschlag und Lufttemperatur

Zur Berechnung der $k_u \cdot i$ -Versickerungen wurde ein umfassendes AZUR-Programm namens UZ-EDITOR erstellt, welches die Rohdatenbereinigung, diverse Eichfunktionsumrechnungen, die Matrixpotentialzusammensetzung aus Gipsblöcken, Tensiometern und MPS6-Sensoren, die Umrechnung volumetrischer Wassergehalte auf SWI-Werte, den pf -Kurvenexport, die Ermittlung von Matrixpotentialgradienten, Wassermengenzitreihen, gewichtet gemittelten Profilzeitreihen von Wassermengen, SWI- und Temperaturwerten (Gesamtprofil, durchwurzelter Bereich, Bereich unter der Durchwurzelungstiefe), weiters von Profilnulllinien- und k_u -Zeitreihen (aus $k_u(\text{Wassergehalt, Matrixpotential}) = q/i$) sowie schlussendlich von Versickerungszeitreihen aus $k_u \cdot i$ und aus Profilwassermengenabnahmen unter Berücksichtigung von Zusatzinformationen (SWI-Zustand, Saugspannungsgradient) umfasst.

In Österreich findet aktuell ein reger Austausch verschiedenster Institutionen, welche mit Bodenwasserdaten arbeiten und/oder messen, über Auswertemethoden im Rahmen der Erstellung einer gemeinsamen „Bodenwasseranleitung“ statt.

3. GW-TOOLS

3.1 Grundkonzepte von GW-TOOLS

Ausgangspunkt war das Erfordernis der Istbestandsanalyse im Nationalen Gewässerbewirtschaftungsplan 2003, Grundwasserspiegellagen für alle österreichischen Grundwasserkörper darzustellen. Die Lösung bestand zunächst in einer SURFER®(Golden Software LLC,

Colorado)-Scripter-Applikation, deren Flexibilität bald nicht mehr ausreichte. Scripter wurde durch ein eigenständiges Windows-Softwarepaket zur Anbindung von AZUR-scripts, xls(x)-, csv-, dbf-Dateien oder beliebige Datenbanken und zur größtmöglichen Öffnung des Inputs, des Outputs und der Methodik ersetzt.

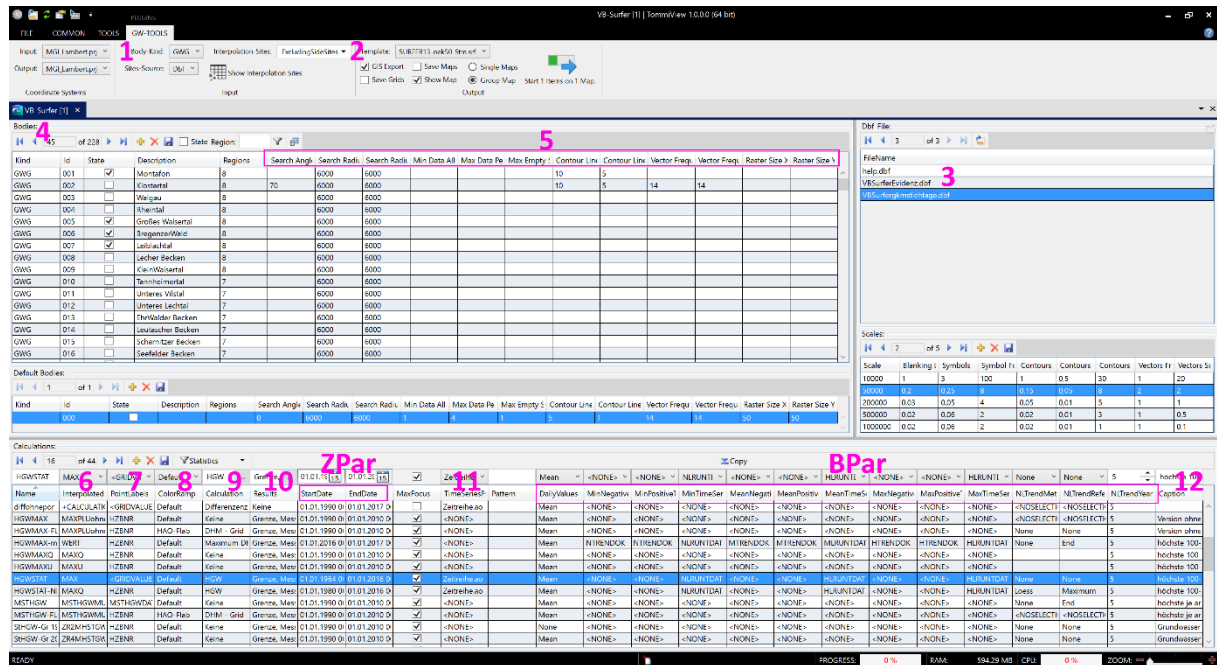


Abb. 4: GW-TOOLS-Maske

Tab. 1: Merkmale von GW-TOOLS aus Abb. 4

Ziffer	Merkmal
1	Variabler Flächenbezug wie Grundwassergebiet, Messstellengruppe, ...
2	Vorlagen für SURFER-Karten mit ÖKS, Messnetzen, verschiedenen Shapes
3	Stammdatentabellenwahl jedenfalls mit Koordinaten, Interpolations-, Labelsparnen
4	Auflistung der in 1 gewählten Interpolationsflächen (z.B 240 Grundwassergebiete)
5	Parametrisierung der Interpolationsmethode (ggw. SURFER ordinary kriging)
6	Wahl des Interpolationsfeldes aus der in 3 gewählten Tabelle
7	Wahl des Postmap-Pointlabelfeldes aus der in 3 gewählten Tabelle
8	Wahl der Farbrampe für Imagedarstellung des Interpolationsergebnisses
9	Berechnung: Interpolation, HGW, Script, Maximum DHM, Minimum Stauer, DHM-Grid, GridxPorosität, Grid=>Tabelle, Differenzenzeitreihen
10	Ergebnisdarstellung: keine, Grenze, Messstellen, Raster Bild, Schichtenlinien, Vektoren
11	Zeitreihenprovider: flexible script-gesteuerte parametrisierbare Schnittstelle zu Zeitreihen-Datenhaltung
12	Überschrift der SURFER-Ergebniskarte
ZPar	Zeitraumangaben
BPar	Parametrisierung für in 10 gewählte Berechnung

In einem umfangreichen Settings-Modul werden u.a. Processoreinstellungen getroffen, Farbrampen erstellt, Plugins (z.B. SURFER-Version, TIN-Interpolation) ausgewählt und parametrisiert, Pfade gelegt, Statistikeinstellungen wie Wahl und Parametrisierung der Verteilungen vorgenommen.

3.2 Ergebniskarten: SURFER-Karten oder shapes für qgis-Karten

Die Automatisierung umfasst einerseits die Gebietstabelle (obere linke Tabelle in Abb. 4), andererseits die Berechnungstabelle (untere Tabelle in Abb. 4), wobei die Ergebnisse in Einzelkarten oder – übereinander- und nebeneinander gelegt – in eine Gruppenkarte münden. Mit den hochauflösenden Kartenausgaben ab SURFER-Version 13 (pdf, jpg) ausgehend von Grundkarten mit ausreichend detaillierter Topographie kann das GIS-Postprocessing entfallen – s Abb. 5. Daher wird in GW-TOOLS auf die Layerreihenfolge und Transparenzen geachtet und die Basiskarten (Ziffer 2 in Abb. 4) dahingehend vorbereitet.

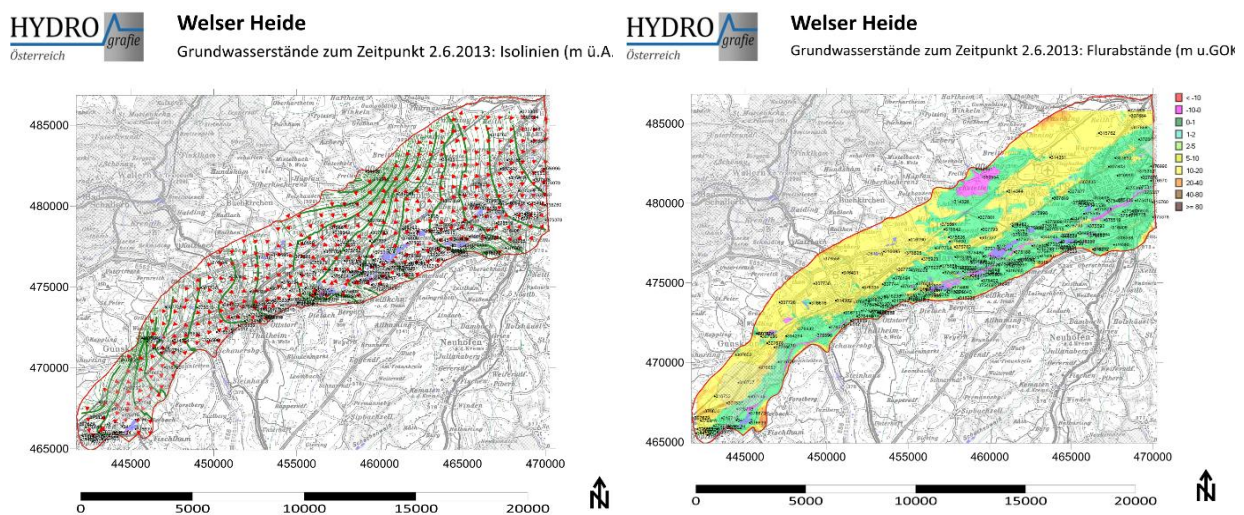


Abb. 5: SURFER-Karten – ohne GIS-Postprocessing

Dank SURFER-Export-dpi von $\gg 600$ erlauben solche Karten Zooming bis über 1000 % ohne Verlust von Schärfe.

3.3 spezielle Berechnungen: Statistik, Zeitraum-N/M/H-GW

In GW-TOOLS ist eine komplette HGW-Statistik implementiert. Die verwendete Modulbibliothek orientiert sich an der vom IHHW/Prof Fürst für die Ermittlung von HGW100 verwendeten. Es wird versucht, die Verteilungen: generalized extrem value, generalized logistic, generalized normal, Pearson 3, generalized pareto und Gumbel anzupassen, wobei mit Jahresextrema, partiellen Extrema und regionalen Verteilungen gerechnet wird. Zu jeder Messstelle werden Wahrscheinlichkeitsdiagramme zwecks rascher Vergleichbarkeit mit Flurabstand erstellt. Nicht-lineare Trends, wie sie durch Kombinationen von Klimaveränderungen und Änderungen anthropogener Beeinflussungen verursacht werden, können – mit viel Vorsicht und Datenkontrolle - eliminiert werden, wenn andernfalls keine Verteilungen anpassbar sind. Hierfür werden Plots der Original- und der modifizierten Zeitreihen als Kontrollinstrument in einheitlichen Zeitmaßstäben und mit Flurabstand bereitgestellt. Der Forderung: einige hun-

dert Messstellen rasch und effizient im Überblick zu behalten und miteinander vergleichend kontrollieren zu können, wurde viel Gewicht bei der Softwareentwicklung zugewiesen.

Ein Spannungsfeld zwischen Wissenschaft und Praxis stellt die Verwendung von Vergangenheitswerten vor anthropogenen Einschnitten in den Grundwasserkörper dar: die Klimawandel bedingten Extreme führen doch wieder zu vergleichbaren Grundwasserspiegellagen, wenn auch aus anderen Gründen wie zu früheren Zeiten, weswegen die PraktikerInnen in den hydrographischen Diensten diese Werte gerne heranziehen.

Die Frage nach Stichtagen mit höchstem, mittlerem und niederstem Grundwasserspiegel für ein Grundwassergebiet oder eine Messstellengruppe in einem Zeitraum beantwortet ein AZUR-Programm, welches tagesweise durch die Zeitreihen der betroffenen Messstellen schreitet und dabei – gefällennormiert – das Datum mit insgesamt höchster, niederster, mittlerer Summe der Grundwasserspiegellagen der Messstellen errechnet. Solche Stichtagspläne lassen die Änderungen der Grundwasserströmungsrichtungen bei unterschiedlichen Grundwasserniveaus erkennen.

3.4 Gebiets-Volums- und Versickerungszeitreihen

Das Hauptmerkmal von GW-TOOLS ist die optimierte Rasterverarbeitung. Es werden in der Software alle Beschleunigungsmöglichkeiten ausgeschöpft, sodass bereits mit leistungsfähigen Laptops Rasterzeitreihen von Grundwassergebietsspiegeln auf Tagesbasis möglich sind.

Dies eröffnet die Möglichkeit, die in Kapitel 2.1 beschriebenen Algorithmen auf Gebietsgrundwasserspiegel statt auf Einzelmessstellen anzuwenden. Eine Anwendung fand dies bei den Flussgebietsgrundwasservolumsabschätzungen im hydrographischen Jahrbuch 2015.

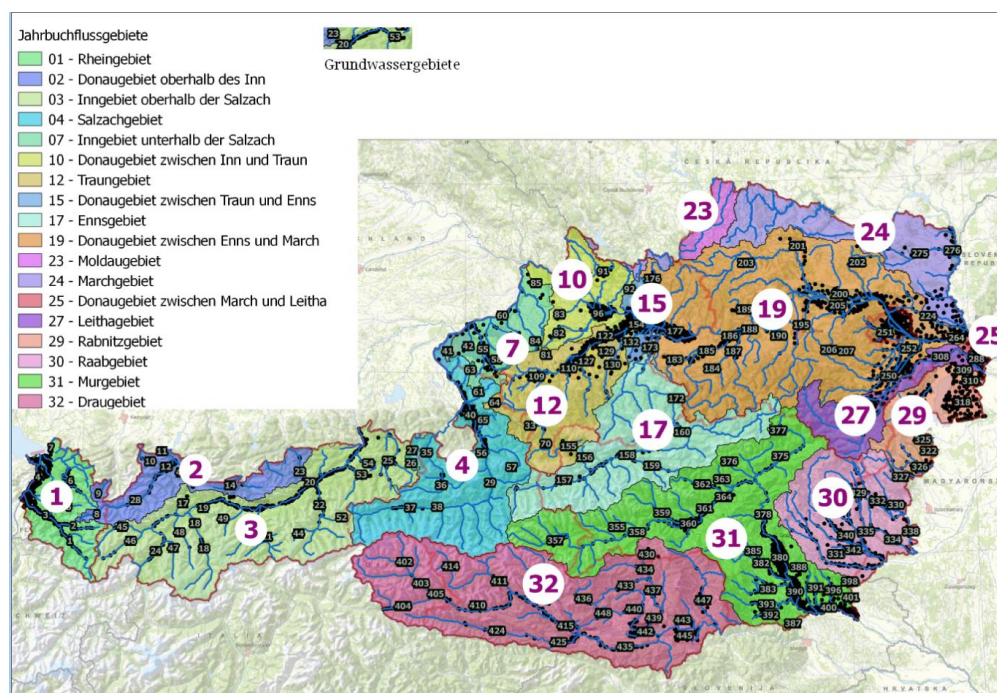


Abb. 6: die 32 Jahrbuchflussgebiete in Österreich

Die folgende Abbildung enthält die Grundwasservolumsentwicklungen in 4 Flussgebieten seit dem 1.1.1990. Die in gelb dargestellte Fläche kennzeichnet den Schwankungsbereich zwischen den seit 1990 aufgetretenen Tagesminima und Tagesmaxima. Die Linie in blau ist der Verlauf im Jahr 2014 und die Linie in rot der Verlauf 2015.

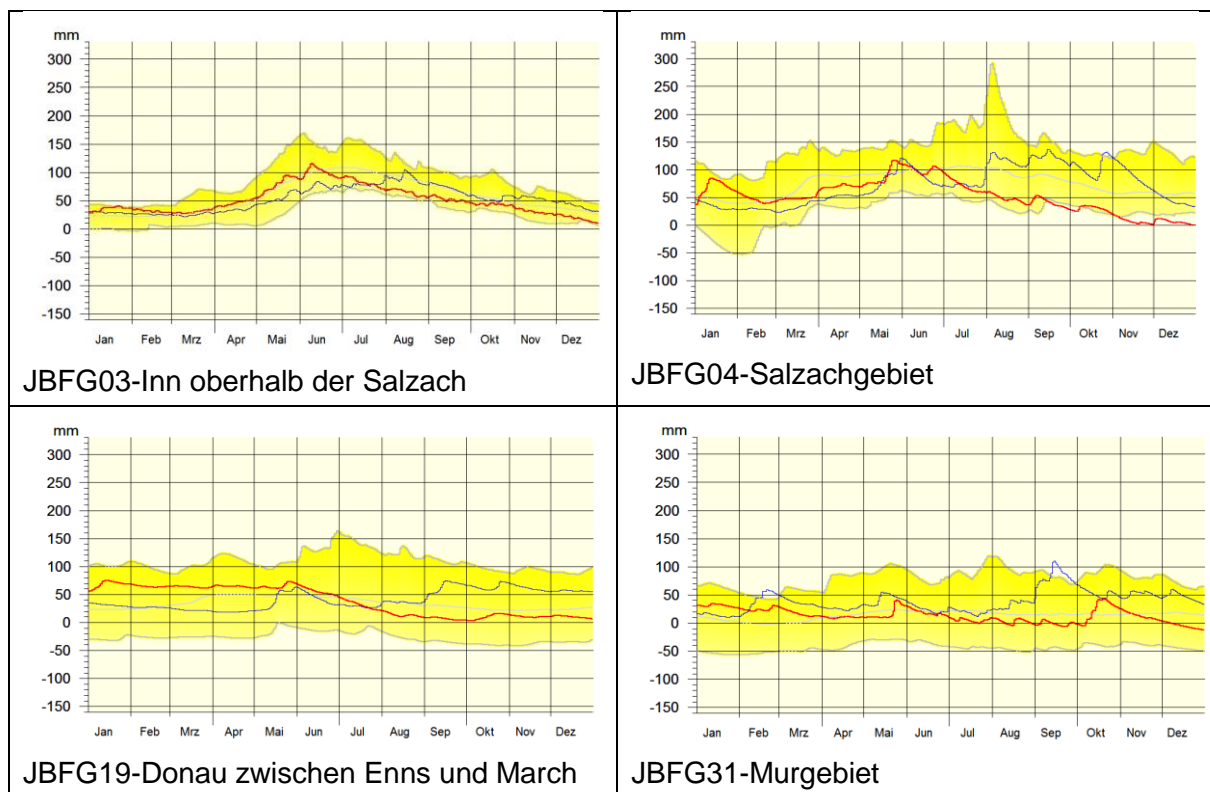


Abb. 7: Grundwasservolumsentwicklungen in 4 Jahrbuchflussgebieten – aus dem hydrographischen Jahrbuch von Österreich 2015.

Literatur

Hydrographisches Jahrbuch von Österreich 2015, 121. Band, Hydrographischer Dienst in Österreich, Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus.

Fürst, J., Bichler, A., 2011. Ermittlung extremer Grundwasserstände Nördliches und Südliches Linzer Feld. Bericht an das Amt der Oberösterreichischen Landesregierung, Abteilung Oberflächenwasserwirtschaft, Schutzwasserwirtschaft und Hydrografie, August 2011.

Fürst, J., 2012. Verbesserte Schätzung extremer Grundwasserstände im Marchfeld. Bericht an das Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Abteilung VII/3, Dezember 2012

Ein robustes Gletschermodul für die Hochwasservorhersage in hochalpinen Gebieten: Entwicklung, Parametrisierung und Validierung auf der Basis unterschiedlicher verfügbarer Daten

Ingo Haag, Dirk Aigner, Georg Raffeiner

Zusammenfassung

Für die Abfluss- und Hochwasservorhersage in hochalpinen Gebieten ist der Beitrag von Gletscherflächen auch bei geringem Vergletscherungsanteil oft von zentraler Bedeutung. Daher wurde das Hochwasservorhersagemodell LARSIM um ein robustes Gletschermodul erweitert. Für die Entwicklung und Parametrisierung wurden unterschiedliche glaziologische und hydrologische Daten aus Quellgebieten der Hohen Tauern in Osttirol verwendet. Das Modul wurde anhand des Abflusses aus Gletscherschmelze, der zeitlich variablen Ausdehnung aperer Eisflächen und der Reaktion der aperen Gletscher auf Regenniederschläge im Osttiroler Isel-Einzugsgebiet erfolgreich validiert. Die guten Ergebnisse des Gletschermoduls konnten im ersten Jahr des operationellen Betriebs des LARSIM-Hochwasservorhersagemodells für die Osttiroler Drau (einschließlich Isel) untermauert werden.

1. Einführung und Zielsetzung

Bereits bei geringem vergletschertem Flächenanteil von wenigen Prozent ist der Einfluss von Gletschern für sommerliche Hochwasser von zentraler Bedeutung, da die Gletscherschmelze einen hohen Abflusssockel bedingt und apere Gletscherflächen intensive Abflussreaktionen auf Regenniederschläge zeigen (z. B. Braun & Weber 2002). Für die Hochwasservorhersage in hochalpinen Gebieten ist es deshalb notwendig, den Beitrag der Gletscherschmelze zum Abfluss und den zeitlich variablen Flächenanteil aperer Eisflächen sowie deren Reaktion auf Niederschläge zuverlässig zu simulieren. Vor diesem Hintergrund sollte ein robustes Gletschermodul für LARSIM entwickelt werden, das neben der fachlichen Eignung möglichst leicht in die bestehende Modelstruktur integriert werden kann und nur so komplex wie nötig bzw. so einfach wie möglich ist.

2. Das LARSIM-Gletschermodul

2.1 Aufbau und Funktionsweise des Gletschermoduls

Mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM wird der terrestrische Wasserkreislauf räumlich verteilt simuliert. Die Aspekte der Abflusskonzentration und des Wellenablaufs in den Gerinnen werden dabei auf der räumlichen Ebene von Teilgebieten (häufig $\sim 1\text{km}^2$) berechnet. Die Abflussbildung (inkl. Schneedynamik, Verdunstung, Bodenwasserhaushalt) innerhalb der Teilgebiete wird subskalig auf der räumlichen Ebene von Hydrotopen simuliert (LEG 2019). Daher wurden spezifische „Gletscher-Hydrotöpfe“ (Landnutzungs-kategorie=Gletscher) eingeführt. Die Gletscher-Hydrotöpfe werden darüber hinaus in Höhenzonen unterteilt, sodass das nachfolgend beschriebene Gletschermodul separat auf jede Höhenzone eines Gletscher-Hydrotops angewandt wird.

Im vorliegenden Ansatz wird von stationären Gletschern mit konstanter Ausdehnung ausgegangen, da die langjährige Dynamik des Gletschers (Vorrücken, Abschmelzen) für die kurzfristige Abflussdynamik in einem operationellen Vorhersagemodell nicht relevant ist. Längerfristige Veränderungen der Gletscherausdehnung können jedoch leicht durch die Assimilation entsprechender Vermessungsdaten im Modell berücksichtigt werden (ATLR 2017).

Die grundlegende Funktionsweise des Gletschermoduls ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt. Die Dynamik der Schneeakkumulation und -ablation für die Gletscher-Hydrotope wird weitgehend analog zu anderen Freilandflächen simuliert. Hierfür wird die vollständige Energiebilanz (W_{tot}) mit (flüssigem) Niederschlag (W_{nied}), kurz- und langwelliger Strahlungsbilanz (W_{RNS} , W_{RNL}) sowie den turbulenten Strömen fühlbarer und latenter Wärme (W_{sense} , W_{latent}) berücksichtigt. Außerdem wird die Setzung der Schneedecke und der Rückhalt flüssigen Wassers simuliert, sodass Regenniederschlag erst dann zum Abfluss kommt, wenn er nicht mehr vom Schnee auf dem Gletscher zurückgehalten wird (Haag & Bremicker 2013). Zusätzlich kann, wie von Konz & Seibert (2010) vorgeschlagen, in vereinfachter Weise berücksichtigt werden, dass ein kleiner Teil des Schnees in Firn und Eis umgewandelt wird. Die „Umwandlungsrate“ kann als Kalibrierparameter (m_{eis}) in der Einheit % des Schneewasseräquivalents je Tag vorgegeben werden (Abbildung 1).

Die Schmelze von Gletschereis tritt erst dann auf, wenn kein Schnee mehr in der jeweiligen Höhenzone des Gletscher-Hydrotops liegt (aperer Gletscher). Die Berechnung der Gletschereis-Schmelze basiert dabei auf derselben Energiebilanzbetrachtung wie beim Schnee (Abbildung 1). Die Energiebilanzbetrachtungen können weitgehend physikalisch basiert durchgeführt werden (Haag & Bremicker 2013). Für die Berechnung der turbulenten Ströme fühlbarer und latenter Wärme müssen jedoch entsprechende Übergangskoeffizienten f_0 und f_1 festgelegt werden, die im Modell für Schnee und Eis unterschiedlich sein können.

Außerdem kann die Albedo (α) von Schnee und Eis räumlich stark variieren (Paterson 2001), weshalb diese als Kalibrierparameter für die kurzwellige Strahlungsbilanz verwendet wird. Für Schnee und Eis können unterschiedliche α vorgesehen werden. Dabei repräsentiert der Wert für Gletschereis eine zeitlich konstante Albedo, während für Schnee die Albedo von Neuschnee angegeben wird und modellintern berücksichtigt wird, dass die Albedo mit zunehmendem Schneealter abnimmt (Haag & Bremicker 2013).

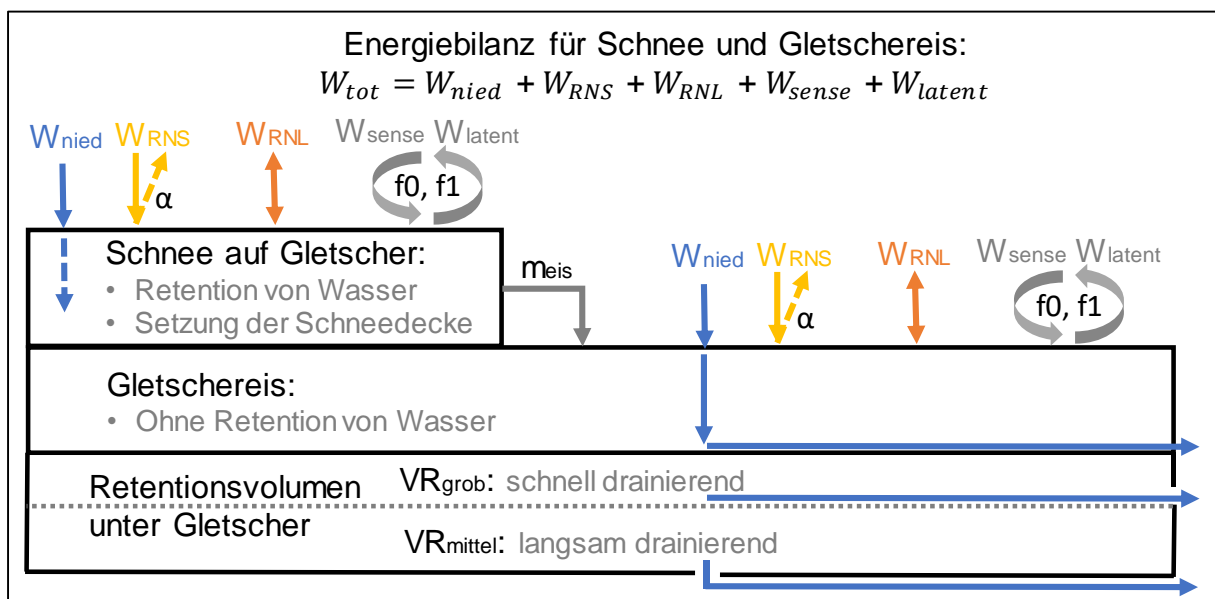


Abb. 1: Schemaskizze des LARSIM-Gletschermoduls.

Auf aperen Gletscherflächen wird Abfluss aus der Eisschmelze, die aus der Energiebilanz resultiert, sowie ggf. aus zusätzlichem Regenniederschlag gebildet. Analysen der ersten Ergebnisse haben gezeigt, dass zusätzlich die Retention unter dem Gletscher berücksichtigt werden muss, da es im Frühjahr zur Verzögerung der schneeschnmelzbedingten Abflussreaktion kommt und im Winter ein längerfristiges Auslaufen zu beobachten ist. Daher kann für die Gletscher-Hydrotope ein Retentionsvolumen (unter dem Gletscher) vorgesehen werden, das in einen schnell drainierenden Anteil (VR_{grob}) und einen langsam drainierenden Anteil (VR_{mittel}) unterteilt ist. Damit reagiert dieses Retentionsvolumen grundsätzlich analog zum LARSIM-Bodenmodul (mit $VR_{\text{grob}}=LK$ und $VR_{\text{mittel}}=nFK$). Im Gegensatz zu anderen Landnutzungen ist für Gletscher die Verdunstung aus diesem Retentionsvolumen jedoch unterbunden, d. h. VR_{grob} und VR_{mittel} werden nur durch die laterale bzw. vertikale Drainage von Wasser entleert.

2.2 Parametrisierung des Gletschermoduls

Für die Anpassung des Gletschermoduls musste das Retentionsvolumen unter den Gletschern (VR), die Parameter m_{eis} für die Umwandlung von Schnee in Gletschereis, die Albedo α sowie die Übergangskoeffizienten f_0 und f_1 für die turbulenten Wärmeströme jeweils getrennt für Schnee bzw. Gletschereis identifiziert werden. Hierfür wurden einerseits Abflussmessungen der Pegel Hinterbichl (Mühle)/Dorferbach und Hinterbichl/Isel verwendet. Andererseits konnte auf punktuelle Schneemessungen auf dem Mullwitzkees (im Einzugsgebiet des Dorferbachs) zurückgegriffen werden, aus denen sich der ungefähre Zeitraum für das Ausapern des Gletschers in unterschiedlichen Höhen ableiten ließ (Abbildung 2).

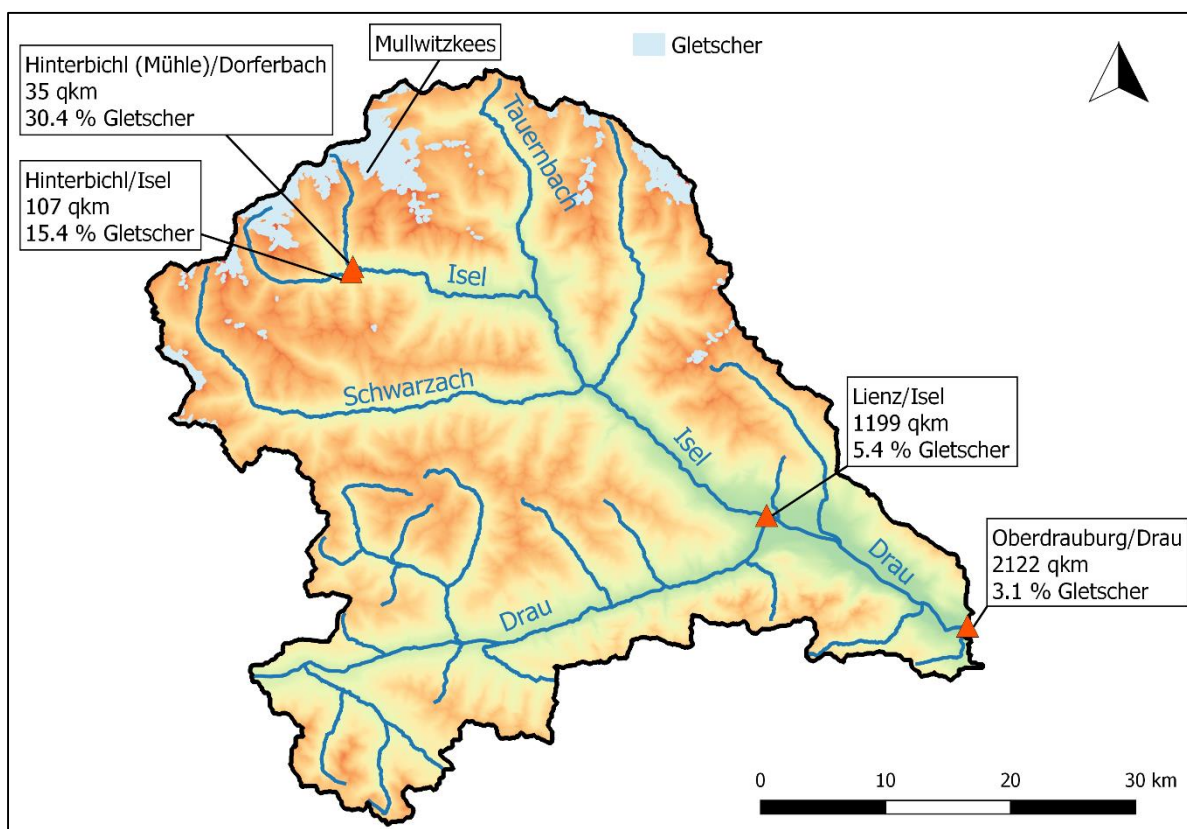


Abb. 2: Untersuchungsgebiet mit Gletscherausdehnung und hier ausgewerteten Pegeln.

Die schneespezifischen Parameter α (für Neuschnee), m_{eis} sowie f_0 und f_1 wurden anhand der Schneemessungen, der Abflussreaktion auf Regenniederschläge zu unterschiedlichen Zeitpunkten und des jahreszeitlichen Verlaufs des Abflusses (Schneesmelzabfluss) optimiert. Die Albedo des Gletschereises und die Parameter f_0 und f_1 für Eis wurden anhand des Abflussniveaus während weitgehend schneefreien Spätsommermonaten sowie anhand des Abfluss-Tagesgangs in diesen Zeiträumen bestimmt. Die Parameter f_0 und f_1 waren sowohl für die Schneedynamik wie auch für die Gletscherschmelze von geringer Sensitivität. Daher konnten für Schnee und Gletschereis jeweils dieselben Werte verwendet werden, was den physikalischen Erwartungen entspricht. Das Retentionsvolumen unter den Gletscherflächen wurde anhand der Verzögerung der Abflussreaktion nach der Schneesmelze und vor allem anhand des allmählichen Rückgangs des Abflusses in den Wintermonaten abgeschätzt. Die so abgeleiteten Parameterwerte sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Die Werte liegen im physikalisch plausiblen Bereich (vgl. Paterson 2001).

Tabelle 1: Werte der für das Gletschermodul maßgeblichen Parameter.

	f_0 [W/(m ² K)]	f_1 [J/(m ³ K)]	α []	m_{eis} [%/d]	VR_{grob} [mm]	VR_{mittel} [mm]
Schnee auf Gletscher	2,5	1,8	0,82*	0,05	50	100
Gletschereis	2,5	1,8	0,30	-		

*Albedo von Neuschnee, die mit der Alterung des Schnees abnimmt

3. Ergebnisse, Diskussion und Ausblick

Die anhand von einem Gletscher und zwei Pegeln abgeleiteten Parameterwerte wurden für alle Gletscher-Hydrotope des Isel-Einzugsgebiets unverändert übernommen. Alle weiteren Abflussprozesse im Osttiroler Drau-Einzugsgebiet (inklusive Isel) wurden analog zu anderen LARSIM-Modellen durch physikalisch basierte Parametrisierung bzw. Kalibrierung der konzeptionellen Modellbausteine nachgebildet (ATLR 2017).

Abbildung 3 zeigt den gemessenen sowie den mit und ohne Gletschermodul simulierten Abfluss für die Pegel Hinterbichl (Mühle)/Dorferbach und Lienz/Isel (vgl. Abbildung 2) für den Spätsommer 2013. Es wird deutlich, dass der ausgeprägte Gletschereinfluss auf die Abflussdynamik (auch am nicht für die Parametrisierung des Gletschermoduls benutzten Pegel Lienz) gut nachgebildet wird. Dasselbe gilt für weitere Pegel im Isel-Einzugsgebiet (ATLR 2017), die hier nicht dargestellt sind. Das mittlere Abflussniveau wird in Hinterbichl ohne Gletscher um ca. 50% unterschätzt, während für Lienz (bei 5% Vergletscherungsanteil) die Unterschätzung des mittleren Abflussniveaus noch ca. 35 % beträgt. Zudem sind die Tagesgänge bei Berücksichtigung der Gletscher wesentlich ausgeprägter, sodass die Tagesmaxima ohne Berücksichtigung der Gletscher um bis zu 75% unterschätzt werden. Dies unterstreicht die Bedeutung von Gletschern und Gletschermodul für valide Abflusssimulationen und -vorhersagen auch für Pegel mit geringem Vergletscherungsanteil von wenigen Prozent. Darüber hinaus kann der zeitliche Verlauf des Ausaperns von Gletscherflächen mit dem Gletschermodul realistisch nachgebildet werden: Die am tiefsten gelegenen Gletscherbereiche in Höhen um 3.000 m apern meist im Juli aus, während die höchstgelegenen Bereiche über 3.500 m in der Regel ganzjährig schneebedeckt bleiben. Ebenso kann die Reaktion der

aperen Gletscherflächen auf Regen (bei ausreichender Genauigkeit des Niederschlags) gut wiedergegeben werden (Ergebnisse nicht dargestellt, ATLR 2017). Diese guten Ergebnisse des Gletschermoduls konnten im ersten Jahr des operationellen Betriebs des LARSIM-Hochwasservorhersagemodells für die Osttiroler Drau (einschließlich Isel) beim HD Tirol bestätigt werden.

Es wird also deutlich, dass die Berücksichtigung der Gletscher für die Hochwasservorhersage im hochalpinen Bereich unerlässlich ist. Das relativ einfache und robuste LARSIM-Gletschermodul kann die hierbei wesentlichen Einflüsse gut abbilden. Für Langzeitsimulationen und Projektionen zum Gletscherrückgang könnte das Modul um die Massenbilanz der Gletscher erweitert werden. Eine wichtige Grundlage dafür ist mit dem Parameter m_{eis} bereits gelegt, mit dem die Umwandlung von Schnee in Gletschereis abgeschätzt werden kann.

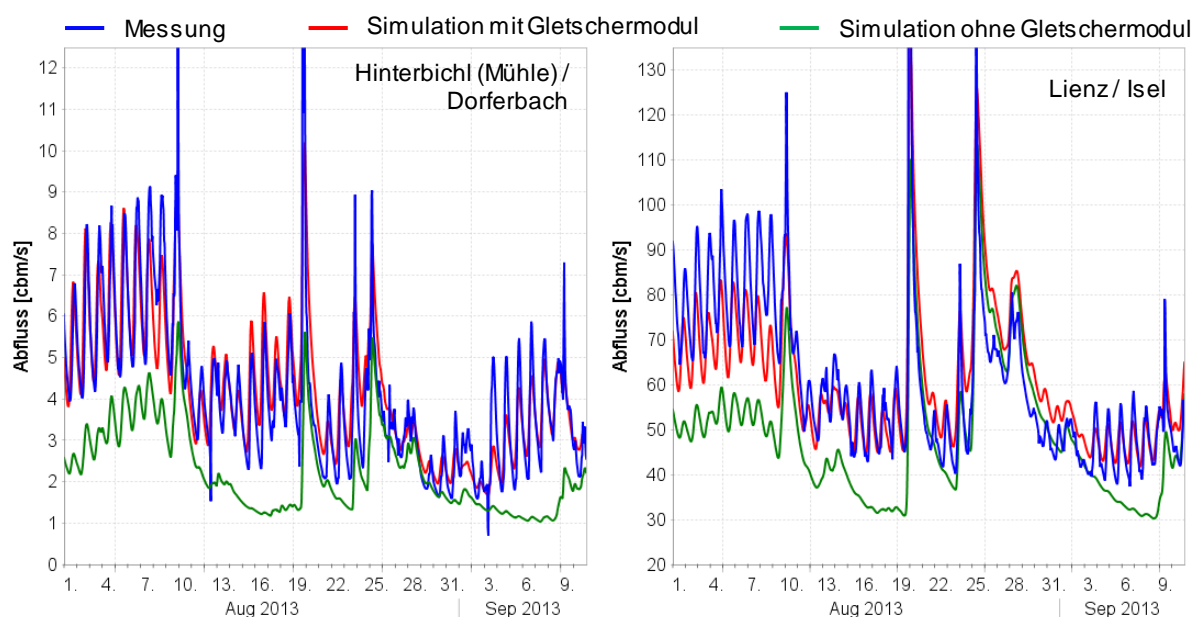


Abb. 3: Gemessene und simulierte Abflüsse für die Pegel Hinterbichl (Mühle) / Dorferbach und Lienz / Isel.

Literatur

- ATLR, 2017. Erstellung und Kalibrierung des Wasserhaushaltsmodells Drau mit LARSIM. HYDRON GmbH im Auftrag des Amtes der Tiroler Landesregierung (unveröffentlicht).
- Braun, L., Weber, M. 2002. Droht im nächsten Sommer Hochwasser vom Gletscher? Rundgespräche der Komm. f. Ökologie der BAdW München, Vortrag vom 22.10.2001, 22 S.
- Haag, I., Bremicker, M. 2013. Möglichkeiten und Grenzen der Schneesimulation mit dem Hochwasservorhersagemodell LARSIM. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 33.13, 47–58.
- Konz, M., Seibert, J., 2010. On the value of glacier mass balances for hydrological model calibration. *Journal of Hydrology* 385, 238–246.
- LEG 2019. Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele, <http://www.larsim.info/dokumentation/LARSIM-Dokumentation.pdf>, 04.02.2019.
- Paterson, W. S. B., 2001. *The physics of glaciers*, 3. Aufl., Butterworth Heinemann, Oxford.

Simulation von Hochwassern in der Folge von Starkregen mit LARSIM - ein Beispiel für die zielführende Nutzung vorhandener Bodendaten

Ingo Haag, Dirk Aigner, Julia Krumm, Julianna Regenauer, Andreas Steinbrich, Markus Weiler, Angela Sieber, Manfred Bremicker

Zusammenfassung

Der Infiltrationsansatz des Modells RoGeR wurde in leicht modifizierter Form in das Bodenmodul des WHM LARSIM implementiert, um Infiltrationsüberschuss bei Starkregen und daraus resultierende lokale Hochwasser besser abbilden zu können. Die Parameter des physikalisch basierten, kalibrierungsfreien Ansatzes wurden auf Grundlage der Bodenkarte 1:50 000 und der Landnutzung für die Landesfläche von Baden-Württemberg in hoher räumlicher Auflösung abgeleitet und in die LARSIM-WHM der LUBW integriert. Die Modellerweiterung wurde anhand von 19 Starkregen-Ereignissen in 16 naturräumlich unterschiedlichen Einzugsgebieten erfolgreich validiert. Mit der Weiterentwicklung wurde eine wichtige Grundlage für die weitere Verbesserung der Hochwasserfrühwarnung gelegt.

1. Hintergrund und Zielsetzung

Das Wasserhaushaltsmodell (WHM) LARSIM wird seit vielen Jahren in mehreren deutschen Bundesländern sowie in Luxemburg, Frankreich, Österreich und der Schweiz erfolgreich zur Hochwasservorhersage und -frühwarnung eingesetzt und von einer länderübergreifenden Entwicklungsgemeinschaft fortlaufend weiterentwickelt (Bremicker et al. 2013). Der Fokus der Anwendung lag bisher jedoch nicht auf lokalen Hochwassern in der Folge kleinräumiger Starkregen. Nach den verheerenden Sturzfluten in den letzten Jahren sollte überprüft werden, ob und wie das Modell weiterentwickelt werden kann, um auch Infiltrationsüberschuss und Horton-Oberflächenabfluss in der Folge von Starkregenereignissen sowie daraus resultierende (lokale) Hochwasser bestmöglich abzubilden.

2. LARSIM-Weiterentwicklungen für Starkregenereignisse

Mit LARSIM-WHM wird der terrestrische Wasserkreislauf räumlich verteilt simuliert. Die Aspekte der Abflusskonzentration und des Wellenablaufs in den Gerinnen werden auf der räumlichen Skala von Teilgebieten berechnet. In den WHM für Baden-Württemberg werden die Teilgebiete durch 1 km²-Raster repräsentiert. Die Abflussbildung innerhalb der Teilgebiete wird mit dem Bodenmodul subskalig auf der räumlichen Ebene von Hydrotopen simuliert, die durch gleiche bzw. ähnliche Landnutzungen und Bodeneigenschaften definiert sind (LEG 2019). Das modular aufgebaute Bodenmodul wurde um den nur geringfügig modifizierten dynamischen Infiltrationsansatz des ereignisbasierten Modells RoGeR (Runoff Generation Research; Steinbrich et al. 2016) erweitert. Der Infiltrationsansatz aus RoGeR, wurde als geeignet identifiziert, da er physikalisch basiert ist und somit keine Kalibrierung anhand extrem seltener Ereignisse erfordert, RoGeR gute Ergebnisse für die Infiltration von Starkregen liefert, die erforderlichen Parameter aus in der Regel verfügbaren Boden- und Landnutzungsdaten abgeleitet werden können und der Ansatz gut in das bestehende LARSIM-Bodenmodul integriert werden kann.

Die Infiltrationsprozesse über Matrix, Makroporen und Trockenrisse sowie deren Interaktion werden mit dem physikalisch basierten Green-Ampt-Ansatz zeitlich dynamisch simuliert. Die für den Infiltrationsprozess relevante Bodenfeuchte zu Beginn eines Ereignisses wird in

LARSIM innerhalb der Simulation mit dem Bodenmodul dynamisch ermittelt und nicht wie in RoGeR als Anfangsbedingung vorgegeben. Zu beachten ist, dass lediglich die Abbildung des Infiltrationsprozesses und des daraus ggf. resultierenden Horton-Oberflächenabflusses (HOF) aus RoGeR übernommen wurde. Die in LARSIM implementierten Routinen zum Sättigungsflächen-Oberflächenabfluss (SOF) und zum schnellen Zwischenabfluss (SSF) wurden nicht verändert. Hinsichtlich der Abbildung von SOF und SSF unterscheiden sich LARSIM und RoGeR dementsprechend. Details zur Funktionsweise des Infiltrationsmoduls (und des Modells RoGeR) sind in Steinbrich et al. (2016) dargestellt, die Implementierung des dynamischen Infiltrationsmoduls in LARSIM ist in LUBW (2019) detailliert erläutert.

Darüber hinaus wurde in LARSIM die optionale Möglichkeit geschaffen, die Auswirkung der Verschlämmung von Ackerböden auf deren Infiltrationskapazität vereinfacht zu berücksichtigen, indem die Verschlammungsneigung der (Acker-)Böden räumlich differenziert und der tatsächliche Verschlammungsgrad als mittlerer Jahresgang vorgegeben werden (LUBW 2019).

3. Physikalisch basierte Parametrisierung von Boden- und Infiltrationsmodul

Die bestehenden LARSIM-WHM der Landesanstalt für Umwelt LUBW für die gesamte Landesfläche von Baden-Württemberg wurden unter Berücksichtigung der aktuellen LARSIM-Optionen auf der Basis neu verfügbarer Geo-Daten überarbeitet. Neben anderen Aspekten wurde in diesem Zusammenhang auch eine landesweite Parametrisierung des dynamischen Infiltrationsmoduls vorgenommen. Hierfür konnten die nutzbare Feldkapazität (nFK), die Luftkapazität (LK) und die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit des Oberbodens (kf) direkt aus der durch das LGRB Baden-Württemberg bereitgestellten Bodenkarte 1:50 000 entnommen werden. Die für den Green-Ampt-Ansatz ebenfalls erforderliche Saugspannung an der Sättigungsfront wurde analog zum Vorgehen bei RoGeR aus der Bodenart abgeleitet. Die mittlere Häufigkeit und Tiefe von Makroporen wurde ebenfalls analog zu RoGeR aus der Landnutzung abgeschätzt. Die (bei trockenem Boden) maximal mögliche Tiefe von Trockenrissen bei tonhaltigen Böden wurde anhand des Tongehalts abgeschätzt (Details siehe Steinbrich et al. 2016, LUBW 2019). Um die aktuelle Tiefe der Trockenrisse als Funktion der simulierten Bodenfeuchte berechnen zu können, wurden zusätzlich die Wassergehalte an der Ausroll- und der Schrumpfungsgrenze anhand der Bodenart mit der Pedotransferfunktion von Wessolek et al. (2009) bestimmt. Die Verschlammungsneigung der Ackerböden wurde mithilfe der Bodenkundlichen Kartieranleitung aus der Bodenart abgeleitet (Ad-Hoc-AG Boden 2005). Der mittlere Jahresgang des tatsächlichen Verschlammungsgrads wurde in Absprache mit dem LGRB (Dr. F. Waldmann) aus den Hauptackerfrüchten im Land abgeschätzt.

Die so abgeleiteten landesweiten Polygone der Infiltrationseigenschaften wurden mit weiteren für LARSIM relevanten Bodendaten (z. B. nFK und LK bis 1m Bodentiefe, minimale kf der Bodensäule, kapillare Aufstiegsrate), der Landnutzung und den 1 km²- Rastern der Teilgebiete verschnitten. Hieraus ergeben sich die räumlich hoch aufgelösten Polygone der LARSIM-Hydrotope mit gleichen bzw. ähnlichen Landnutzungs-, Bodenspeicher- und Infiltrationseigenschaften. Jedes der 1 km² großen Teilgebiete wird für die Infiltrationsberechnung damit in Hydrotope gleicher Infiltrationseigenschaften unterteilt (im Mittel 23 Hydrotope je

Teilgebiet). Somit kann die räumlich differenzierte Reaktion auf Starkregen wiedergegeben werden, sofern der Modellansatz geeignet ist und die verwendeten Boden- und Landnutzungsdaten für eine adäquate Parametrisierung ausreichen. Eine Kalibrierung des Infiltrationsmoduls ist nicht erforderlich.

4. Validierung der Weiterentwicklungen

Die Modellerweiterung und die vorgenommene Parametrisierung wurden anhand von 19 Starkregen-Ereignissen in 16 naturräumlich unterschiedlichen Einzugsgebieten validiert (Abbildung 1). Hierzu wurden die LARSIM-Modelle für die 16 Gebiete zunächst in herkömmlicher Weise in Stundenzeitschritten unter Verwendung von Stationsdaten des Niederschlags kalibriert (keine Kalibrierung des Infiltrationsmoduls). Dann wurden die in Abbildung 1 aufgeführten Starkregen-Ereignisse mit unterschiedlichen Modelloptionen, Berechnungszeitschrittweiten und Antriebsdaten genauer untersucht (LUBW 2019).

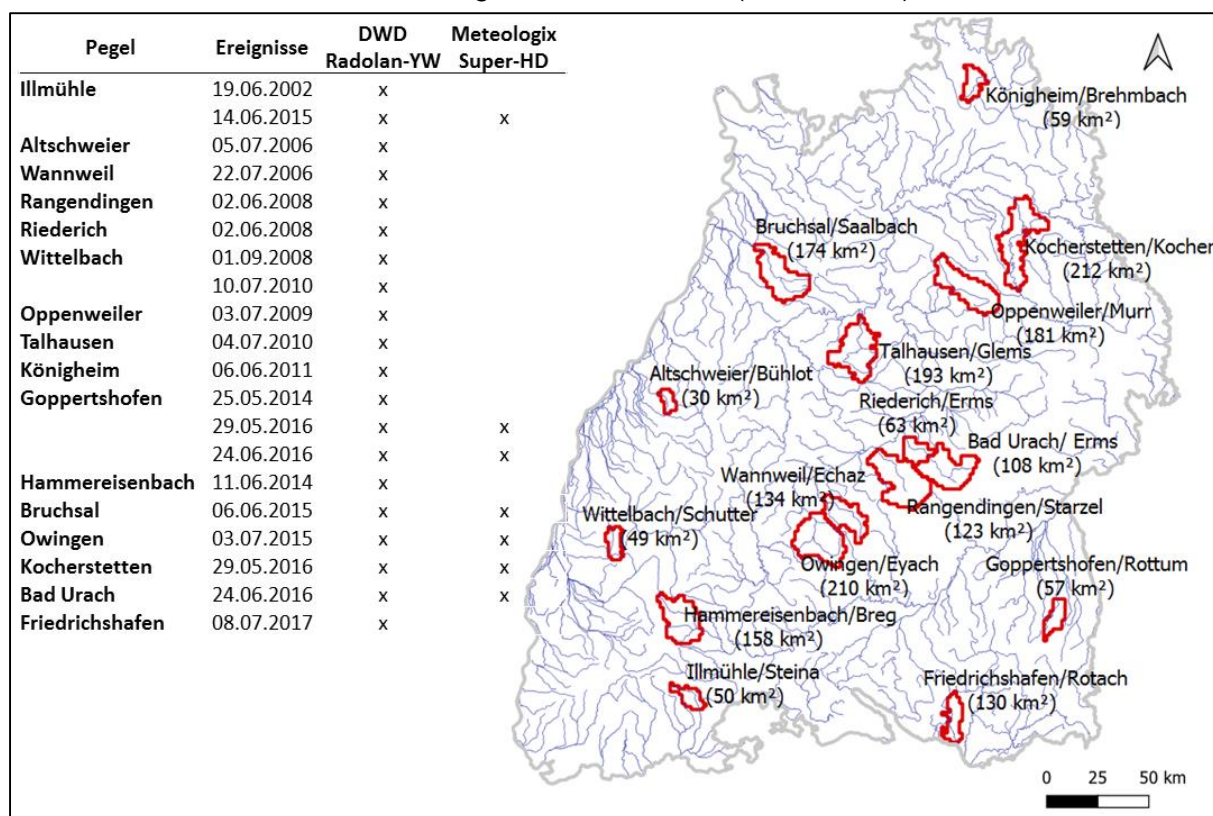


Abb. 1: Hier untersuchte Einzugsgebiete und Starkregenereignisse

In Abbildung 2 werden rechts die gemessenen Scheitel der Abflusspenden für 18 Ereignisse mit den entsprechenden Scheiteln von drei Simulationsvarianten verglichen. Das 19. Ereignis konnte nicht in dieser Form ausgewertet werden, da beim Scheiteldurchgang die Messung ausfiel. Für dieses ansonsten beispielhafte Ereignis sind die entsprechenden Ganglinien links dargestellt. Erwartungsgemäß wird die Abflussreaktion unter Verwendung der herkömmlichen Vorgehensweise, d.h. ohne Infiltrationsmodul (ohne InfDyn), mit Niederschlags-Stationsdaten und einer Berechnungs-Zeitschrittweite von 1 h, systematisch unterschätzt (Abbildung 2, graue Linie bzw. graue Dreiecke). Durch die Verwendung von Radardaten und die Verringerung der Zeitschrittweite auf 5 Min. ergeben sich noch keine relevanten Verbes-

serungen (nicht dargestellt; LUBW 2019). Klare Veränderungen und die Vorteile der hochaufgelösten Radardaten zeigen sich erst durch die Aktivierung des Infiltrationsmoduls. Daher sind in Abbildung 2 zusätzlich die Ergebnisse der Simulation mit Infiltrationsmodul (mit InfDyn) und Radar-Niederschlagsdaten in 5 Min.-Zeitschritten dargestellt. Als Radar-Niederschläge wurden Radolan YW des DWD und soweit verfügbar Super HD der Firma Meteologix verwendet (Abbildung 1).

Die in Abbildung 2 links dargestellte Ganglinie zeigt die charakteristische Unterschätzung der Abflussreaktion durch das herkömmliche Modell (ohne InfDyn, N-Stationen): Das Ereignis wird in der Simulation kaum erkannt. Dieses charakteristische Verhalten führt zur rechts dargestellten systematischen Unterschätzung der Scheitel unter Verwendung des herkömmlichen Ansatzes. Mit InfDyn und Verwendung von Radolan YW gibt es keine systematische Unterschätzung der Abflussreaktion bzw. der Scheitelwerte mehr (rote Linie bzw. rote Punkte in Abbildung 2). Die beiden Ausreißer mit krassen Überschätzungen der Scheitel konnten klar auf un plausible Überschätzungen des Niederschlags durch Radolan zurückgeführt werden (LUBW 2019). Die anderen roten Punkte schwanken um die Ausgleichsgerade. Dabei weisen sie jedoch eine erhebliche Streuung und eine leichte Tendenz zur Überschätzung auf. Werden die Simulationen bei ansonsten gleicher Modellkonfiguration mit dem Radarprodukt Super HD von Meteologix durchgeführt, ergeben sich oft deutlich andere Ergebnisse als mit Radolan (grün gestrichelte Linie bzw. grüne Rauten in Abbildung 2). Im links dargestellten beispielhaften Ereignis sind Abflussscheitel und -volumen nur etwa halb so hoch wie bei der Simulation mit Radolan. Auch für die anderen sechs Ereignisse ergeben sich mit Super HD meist geringere Niederschläge und Abflussreaktionen als mit Radolan. Die mit Super HD und InfDyn simulierten Scheitel liegen überwiegend unter der Ausgleichsgeraden.

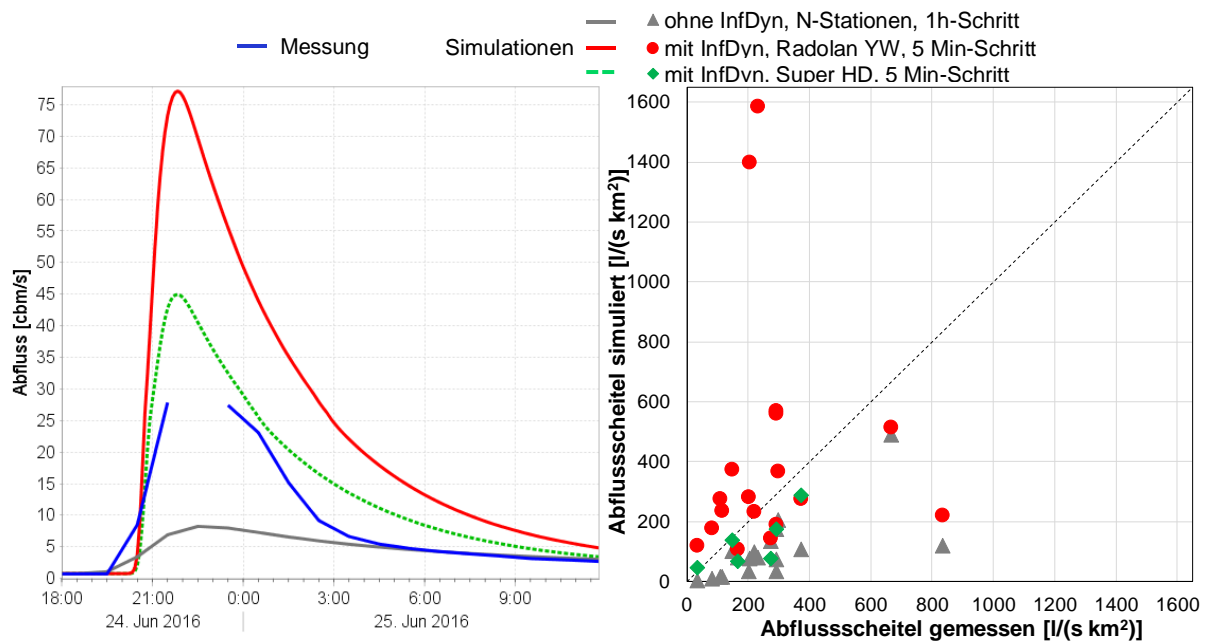


Abb. 2: Gemessene und simulierte Ganglinien für ein Hochwasser am Pegel Goppersthofen/Rottum (links) und Vergleich zwischen simulierten und gemessenen Scheitel-Abflussspenden bei 18 Hochwassern an 16 verschiedenen Pegeln (rechts).

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass Radardaten mit ihrer hohen räumlichen Auflösung für die Simulation lokaler Hochwasser infolge von Starkregen unerlässlich sind. Allerdings unterscheiden sich Niederschlagsmengen und -intensitäten der beiden hier verwendeten Radarprodukte zum Teil erheblich. Die Radarniederschläge einzelner Ereignisse können sogar als klar unplausibel eingestuft werden. Die Radarniederschläge sind also offenkundig mit großen Unsicherheiten behaftet. Trotz der Unsicherheit beim Niederschlagsinput können die Abflussreaktionen der meisten hier untersuchten Hochwasser, die aufgrund lokaler Starkregenereignisse auftraten, mit LARSIM und dem neuen Infiltrationsmodul zufriedenstellend simuliert werden.

5. Diskussion, Folgerungen und Ausblick

Die Ergebnisse zeigen, dass die LARSIM-WHM in Baden-Württemberg mit dem neuen dynamischen Infiltrationsmodul geeignet sind, um den Infiltrationsüberschuss bei Starkregen und daraus resultierende (lokale) Hochwasser zu simulieren. Dies impliziert auch, dass das Infiltrationsmodul mithilfe der landesweit verfügbaren Bodendaten in geeigneter Weise flächendifferenziert parametrisiert werden konnte. Mit der Weiterentwicklung und der innovativen Nutzung vorliegender (Boden-)Daten konnte somit eine wichtige Grundlage für die weitere Verbesserung der Hochwasservorhersage und insbesondere der Hochwasserfrühwarnung auch für kleine Einzugsgebiete gelegt werden.

Die durchgeführten Analysen haben auch gezeigt, dass die Ergebnisse für den Horton-Oberflächenabfluss z. T. sehr sensitiv auf die Bodenfeuchte zu Beginn des Ereignisses reagieren (hier nicht dargestellt). Die Bodenfeuchte hängt wiederum von der Kalibrierung ab, sodass das kalibrierfreie Infiltrationsmodul indirekt durch die Kalibrierung der anderen Parameter beeinflusst wird. Dieser Aspekt und die Konsequenzen für die Kalibrierstrategie zur weiteren Verbesserung operationeller WHM werden auf Basis der vorliegenden Ergebnisse noch näher analysiert.

Darüber hinaus ist langfristig zweifellos auch eine weitere Verbesserung der Modellansätze und ihrer physikalisch basierten Parametrisierung wünschenswert und möglich. Allerdings wird die erreichbare Genauigkeit der hydrologischen Simulationen derzeit offenbar stark von den Unsicherheiten der Radarniederschlagsdaten begrenzt, welche zur Simulation von Starkregenereignissen unabdingbar sind. Entsprechend ist auch die Validierung etwaiger weiterer Verbesserungen des Infiltrationsansatzes anhand realer Ereignisse erschwert.

Literatur

- Ad-Hoc-AG Boden 2005. Bodenkundliche Kartieranleitung KA5, 5. Aufl., Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- Bremicker, M., Brahmmer, G., Demuth, N., Holle, F.-K., Haag, I., 2013. Räumlich hoch aufgelöste LARSIM Wasserhaushaltsmodelle für die Hochwasservorhersage und weitere Anwendungen. KW Korrespondenz Wasserwirtschaft, 2013/6(9), 509-514.
- Steinbrich, A., Leistert, H., Weiler, M., 2016. Model-based quantification of runoff generation processes at high spatial and temporal resolution. Environ. Earth Sci. 75, 1423 (DOI 10.1007/s12665-016-6234-9).

- LEG, 2019. Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele, <http://www.larsim.info/dokumentation/LARSIM-Dokumentation.pdf>, 04.02.2019.
- LUBW, 2019. LARSIM-Weiterentwicklungen für Starkregenereignisse. HYDRON GmbH im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (unveröffentlicht).
- Wessolek, G., Kaupenjohann, M., Renger, M., 2009. Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis. Bodenökologie und Bodengenese Heft 40.

Multikriterielle Analyse eines Wasserhaushaltsmodells unter Berücksichtigung der Unsicherheit der Datengrundlage

Julia Krumm, Ingo Haag

Zusammenfassung

Für das Einzugsgebiet der Großen Dhünntalsperre wurde ein LARSIM Wasserhaushaltsmodell aufgestellt, kalibriert und validiert. Obgleich die Kalibrierung mit einem einheitlichen Parametersatz für das Gesamteinzugsgebiet durchgeführt wurde, konnten die anhand von verschiedenen, voneinander unabhängigen Referenzdaten identifizierten unterschiedlichen Gebietsreaktionen der Unterteilgebiete mit dem Modell nachvollzogen werden. Dies impliziert, dass die räumlich unterschiedlichen Gebietsreaktionen durch die flächendifferenzierte, physikalisch-basierte Parametrisierung (insbesondere der Bodendaten) erfolgreich nachgebildet wird. Entsprechend ist davon auszugehen, dass die Flächendifferenzierung im Modell realistisch berechnet wird und die Modelleinstellungen robust genug sind, um damit verlässliche Szenarienberechnungen durchzuführen.

1. Einleitung und Zielsetzung

Im Wasserhaushaltsmodell LARSIM (LARSIM-WHM) werden räumlich differenzierte Grundlagendaten zu Topographie, Landnutzung und Boden genutzt, um die weitestgehend prozessorientierte Berechnung der Abflussbildung physikalisch zu parametrisieren. Zur Abbildung der Abflusskonzentration enthält das Modell konzeptionelle Ansätze, deren Parameter kalibriert werden müssen. Im Kontext eines BMBF-Projekts wurde ein LARSIM-WHM für das Einzugsgebiet der Großen Dhünntalsperre aufgestellt, kalibriert und validiert. Hauptziele waren die realistische, räumlich differenzierte Simulation der Abflussbildung bei gleichzeitig realistischer Nachbildung des gesamten Talsperrenzuflusses. Dazu sollten die vorliegenden räumlich differenzierten Grundlagendaten (v. a. die bodenphysikalischen Daten) möglichst weit ausgeschöpft werden. Die Kalibrierung sollte hingegen möglichst einfach gehalten werden und die damit zu erzielende Genauigkeit sollte die Unsicherheit der vorliegenden Referenzdaten berücksichtigen. Um die Verlässlichkeit der Simulationsergebnisse zu erhöhen, wurden Referenzdaten aus unterschiedlichen Quellen zur Kalibrierung und Validierung hinzugezogen.

3. Grundlagen und Vorgehensweise

3.1 Untersuchungsgebiet

Die Dhünn ist der längste Zufluss zur Wupper. Ihr Quellgebiet und damit das Einzugsgebiet der Großen Dhünntalsperre liegt im Bergischen Land zwischen ca. 150 und ca. 350 m ü. NN (Abbildung 1). Das natürliche Einzugsgebiet der Talsperre umfasst ca. 60 km².

3.2 Verwendung der bodenphysikalischen Daten

Die verwendeten Bodendaten stammen aus der Bodenkarte 1:50 000 für Nordrhein-Westfalen. Die digitale Bodenkarte sowie zugehörige ASCII-Dateien erlauben die Ableitung von Parameterwerten sowohl integral für die gesamte effektive Durchwurzelungstiefe als auch separat für den Oberboden. Damit steht die Datengrundlage zur Verfügung, um das komplexeste derzeit in LARSIM verfügbare Bodenmodul inklusive eines dynamischen Infiltrationsmoduls zur verbesserten Abbildung von Oberflächenabfluss in Folge von Infiltrations-

überschuss zu parametrisieren (LEG 2019, Haag et al. 2019). Die Datengrundlage enthält damit den maximalen, auf Einzugsgebietsebene für die hydrologische Modellierung mit LARSIM-WHM aktuell nutzbaren Informationsgehalt.

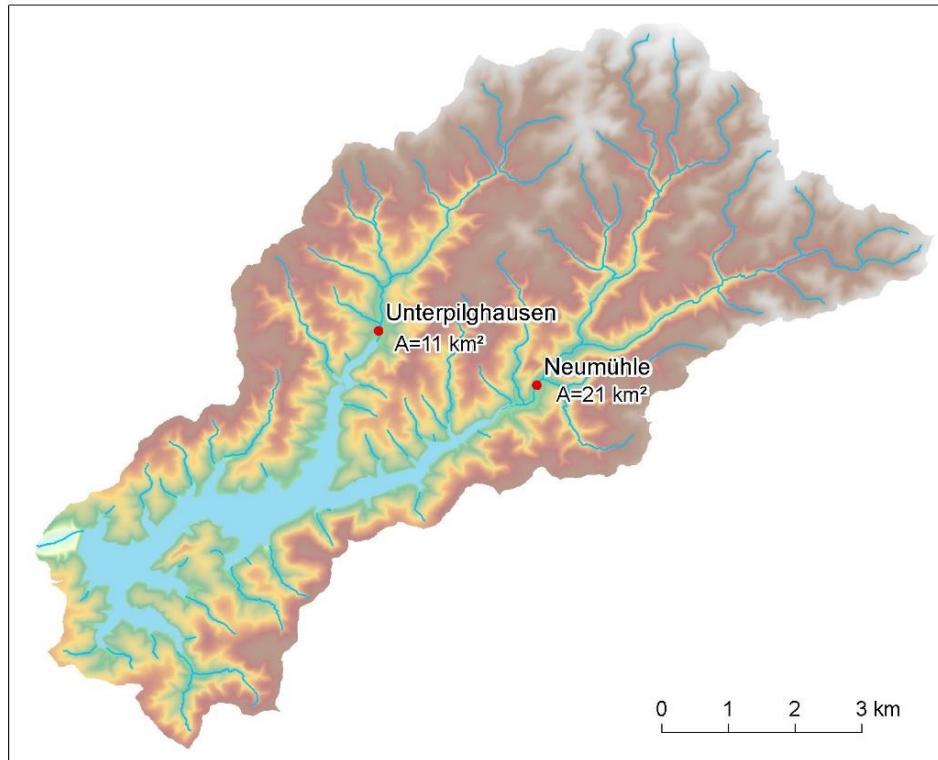


Abb. 1: Einzugsgebiet der Großen Dhünntalsperre und verwendete Pegel.

3.3 Ermittlung der Referenzdaten zur Kalibrierung und Validierung

Als Referenzdaten zur Kalibrierung von LARSIM-WHM werden in der Regel Abflussmessungen verwendet. Für das Einzugsgebiet der Großen Dhünntalsperre lagen Zeitreihen von zwei Kopfpegeln vor (Neumühle / Große Dhünn, Unterpilghausen / Kleine Dhünn, Abbildung 1). Die beiden Pegel decken ca. 50% des Einzugsgebiets der Talsperre ab.

Um einen weiteren, von den Abflussmessungen an den beiden Pegeln unabhängigen Referenzdatensatz verwenden zu können, welcher das gesamte Einzugsgebiet einschließt, wurde der Gesamtzufluss zur Talsperre als Restterm der Talsperrenbilanz bestimmt. Dazu wurden soweit verfügbar gemessene Daten (Abgabe und Wasserentnahme aus der Talsperre, Niederschlag auf die Wasseroberfläche, Veränderung des Talsperrenvolumens innerhalb eines Zeitschritts) verwendet. Als zusätzliche, nicht gemessene, sondern berechnete Größe ging die Verdunstung aus dem Wasserkörper ein. Um die Unsicherheit der Verdunstungsrechnung zu berücksichtigen, wurden drei verschiedene Berechnungsvarianten (Penman-Verfahren, Dalton-Verfahren mit zwei verschiedenen Windfunktionen) verwendet und damit jeweils ein realistischer Bereich des Referenzdatensatzes betrachtet. Dieser Referenzdatensatz für das Gesamteinzugsgebiet wurde im Monatszeitschritt bestimmt. Werden von dem Referenzdatensatz für den Gesamtzufluss zur Talsperre die Pegelmessungen subtrahiert, so

ergibt sich ein vierter Referenzdatensatz, welcher nur das Zwischeneinzugsgebiet ohne Pegel repräsentiert.

Werden die Referenzdatensätze anhand der Regimekurven der Abflussspenden unter Berücksichtigung der Messunsicherheit verglichen (Abbildung 2), so ergibt sich ein geringer Unterschied zwischen den beiden Pegelmessungen. Daher wurden die beiden Pegel-einzugsgebiete mit einem einheitlichen Kalibrierparametersatz geeicht. Als Gütekriterien der Kalibrierung dienten die visuelle Übereinstimmung von gemessenen und simulierten Ganglinien, übliche Gütemaße sowie Übereinstimmung von gemessenen und simulierten Hauptwerten und des Baseflowindex (BFI).

Für den dritten und vierten Referenzdatensatz sind jeweils Bereiche der Regimekurven angegeben, welche die Unsicherheit infolge der Berechnung der Verdunstung aus der Talsperre umfassen (Gesamtzufluss zur Talsperre, Abbildung 2, gelbe Kurve und Abfluss aus dem Zwischeneinzugsgebiet ohne Pegel, Abbildung 2, grüne Kurve). Die Referenzdatensätze 3 und 4 weisen insbesondere in der zweiten Jahreshälfte deutlich niedrigere Abflussspenden auf, als die Referenzdatensätze der beiden Pegel. Diese Unterschiede sind größer als die abgeschätzte Unsicherheit und somit signifikant. Dennoch wurden für das Zwischeneinzugsgebiet die Kalibrierparameter der beiden Oberliegerpegel übernommen, um zu überprüfen, ob die räumlichen Unterschiede in der Abflussreaktion durch die physikalische Parametrisierung nachgebildet werden können.

Die Regimekurven aller vier Referenzdatensätze wurden in der Kalibrierung somit nicht verwendet und standen als Validierungsdatensätze zur Verfügung.

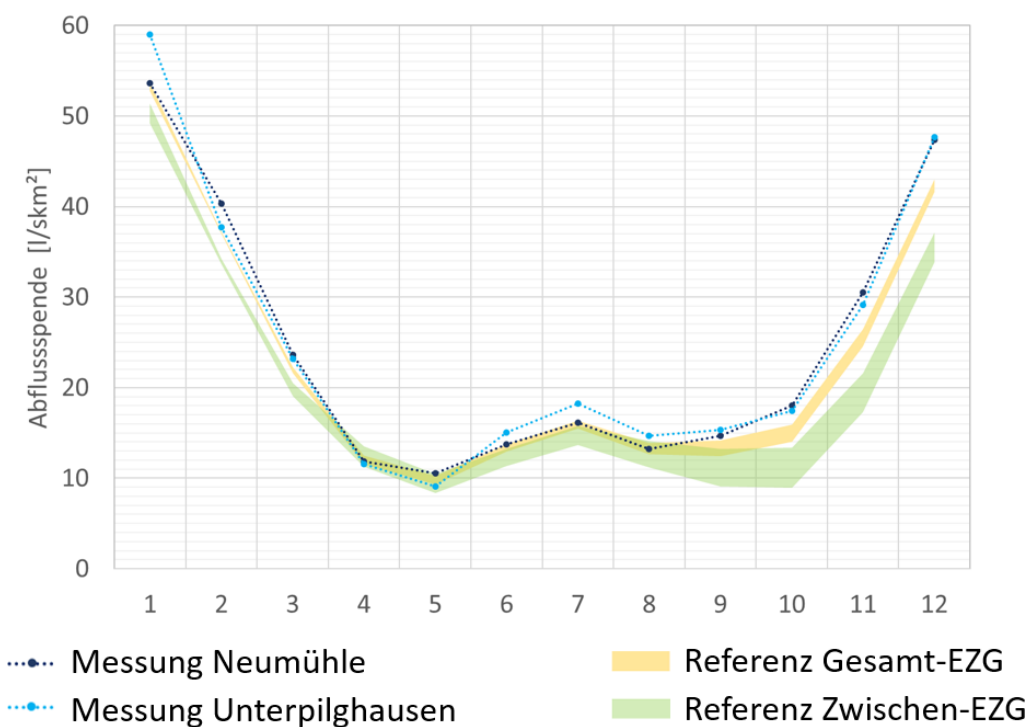


Abb. 2: Vergleich der Referenzdaten. Regimekurven der Abflussspenden für zwei Pegel-einzugsgebiete, das Gesamteinzugsgebiet und das Zwischeneinzugsgebiet ohne Pegel.

4. Ergebnisse

Die Kalibrierung ergab für die beiden Pegeleinzugsgebiete mit einem einheitlichen Kalibrierparametersatz für alle Gütekriterien und alle Abflussbereiche sehr gute Ergebnisse (Tabelle 1).

Tab. 1: Ergebnisse der Kalibrierung an zwei Pegeln. „Ideal“ bezeichnet den jeweiligen Referenzwert, d.h. für Gütemaße den besten theoretische erreichbaren Wert, für alle anderen Kriterien den anhand der Messwerte bestimmten Wert. „Sim“ bezeichnet die Simulationsergebnisse unter Nutzung einheitlicher Kalibrierparameter für das gesamte Gebiet.

		r^2 [-]	NSE [-]	NSE_In [-]	Bilanz [-]	MNQ [m ³ /s]	MQ m ³ /s	MHQ m ³ /s	BFI -
Neumühle	Ideal	1.00	1.00	1.00	1.00	0.06	0.53	7.4	0.25
	Sim	0.87	0.85	0.79	1.02	0.07	0.54	7.0	0.24
Unterpilghausen	Ideal	1.00	1.00	1.00	1.00	0.04	0.28	3.6	0.24
	Sim	0.84	0.82	0.77	0.98	0.04	0.27	3.5	0.25

Die Validierung anhand der Regimekurven zeigte für die beiden Pegeleinzugsgebiete ebenfalls sehr gute Übereinstimmungen (Abbildung 3, links). Dies entsprach den Erwartungen, da die beiden Referenz-Regimekurven auf den für die Kalibrierung verwendeten Abflussmessungen beruhen. Die Validierung der Simulation anhand der Referenzdatensätze 3 und 4 für den Gesamtzufluss zur Talsperre und das Zwischeneinzugsgebiet erbrachte ebenfalls gute Ergebnisse. Die Simulationsergebnisse liegen innerhalb des Unsicherheitsbereichs der Referenzdaten (Abbildung 3, rechts). Auch die im Vergleich zu den Pegeleinzugsgebieten geringeren Abflusspenden von September bis Dezember werden vom Modell abgebildet. Da die Referenzdaten für den Gesamtzufluss zur Talsperre unabhängig von den Referenzdaten an den Pegeln bestimmt wurden, bestätigt diese Validierung, dass der anhand der Pegelmessungen bestimmte Kalibrierparametersatz auch für das Zwischeneinzugsgebiet sinnvoll ist.

5. Diskussion und Schlussfolgerungen

Insgesamt ergeben sich somit gute Modellergebnisse sowohl für die Pegel als auch für den Gesamtzufluss zur Talsperre und damit implizit auch für die Talsperrenbilanz. Die Kalibrierparameter zur Berechnung der Abflusskonzentration konnten einheitlich für das gesamte Einzugsgebiet bestimmt werden. Die räumlich differenzierte Parametrisierung von Topographie, Landnutzung und physikalischen Bodeneigenschaften reicht also aus, um im Modell die unterschiedlichen Abflussreaktionen der Teileinzugsgebiete nachzuvollziehen. Die Ergebnisse bestätigen somit die Qualität der Grundlagendaten, der voneinander unabhängigen Referenzdaten und die gewählte Parametrisierungsstrategie für das Modell. Da die räumliche Differenzierung der Abflussbildung im Modell basierend auf physikalischen Parametern gelingt, ist davon auszugehen, dass die flächenhafte Abflussbildung im Modell insgesamt realistisch simuliert wird und dass die flächenhaften Modellergebnisse wie geplant als Grundlage zur Berechnung von diffusen Stoffeinträgen nutzbar sind. Die erfolgreiche physikalisch-basierte Parametrisierung legt außerdem nahe, dass die Extrapolationsfähigkeit des Modells verlässlich und damit seine Nutzung in Szenarienrechnungen zulässig ist.

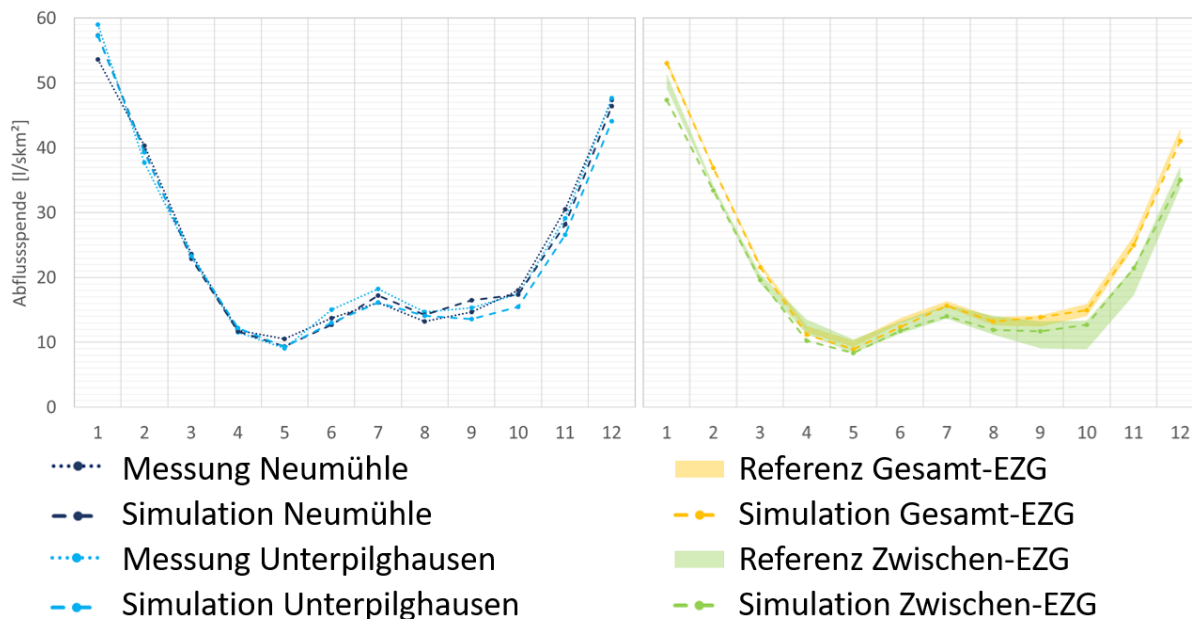


Abb. 3: Vergleich von simulierten Regimekurven der Abflussspenden mit Referenzwerten. Links: Vergleiche für die beiden Pegeleinzugsgebiete. Rechts: Vergleiche für Gesamteinzugsgebiet und Zwischeneinzugsgebiet, dabei Referenzwerte jeweils mit Darstellung des Wertebereichs, der sich aus drei verschiedenen Verdunstungsberechnungen ergibt.

Danksagung Die vorliegende Arbeit wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Fördermaßnahme GRoW gefördert (Förderkennzeichen: 02WGR1431F).

Literatur

Haag, I., Aigner, D., Krumm, J., Regenauer, J., Steinbrich, A., Weiler, M., Sieber, A., Breimicker, M., 2019. Simulation von Hochwassern in der Folge von Starkregen mit LARSIM – ein Beispiel für die zielführende Nutzung vorhandener Bodendaten. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 41.19 (im Druck).

LEG, 2019. Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele, <http://www.larsim.info/dokumentation/LARSIM-Dokumentation.pdf>, 04.02.2019.

Adaption des Wasserhaushaltsmodells LARSIM zur Anwendung bei veränderter Datenlage und unter subtropischen Bedingungen am Beispiel des Passaúna (Brasilien)

Julia Krumm, Ingo Haag, Nils Wolf

Zusammenfassung

Im Kontext eines umfassenderen Projekts zur Mengen- und Gütebewirtschaftung von Trinkwassersperren wurde für das subtropische Einzugsgebiet des Passaúna ein LARSIM Wasserhaushaltsmodell aufgestellt. Dabei wurde zum einen die Auswahl der Berechnungsmodule in LARSIM an die reduzierte Datenlage angepasst. Zum anderen wurde eine geeignete flächendifferenzierte Parametrisierung der Verdunstungsberechnung aus Fernerkundungsdaten abgeleitet. Die erzielten Simulationsergebnisse zeigen, dass das Modell damit erfolgreich für das Einzugsgebiet des Passaúna anwendbar ist. Es ist davon auszugehen, dass mit der gewählten Vorgehensweise auch in anderen Einzugsgebieten zwei relevanten Hemmnissen für die Nutzung von LARSIM bei reduzierter Datenverfügbarkeit und unter unterschiedlichen klimatischen Bedingungen begegnet werden kann.

1. Einleitung

Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM (LARSIM-WHM) dient der prozessorientierten, flächendetaillierten und zeitlich kontinuierlichen Simulation des landgebundenen Wasserhaushaltes. Das Modell wird überwiegend in Deutschland und anderen Ländern Mitteleuropas angewendet (Bremicker et al. 2013). Daher erfolgt auch die Modell(-weiter)-entwicklung zu meist unter Berücksichtigung der Gegebenheiten in dieser Region. Hierzu zählt zum einen eine häufig ähnliche Datenlage für Modellaufbau und Modellantrieb, zum anderen aber auch die ähnlichen klimatischen Bedingungen. Im Rahmen eines umfassenderen BMBF-geförderten Forschungsvorhabens wurde beispielhaft getestet, wie gut sich LARSIM bei gleichzeitig reduzierter Datenverfügbarkeit auf andere klimatische Bedingungen übertragen lässt. Die Übertragung erfolgte auf das Einzugsgebiet des Passaúna im Bundesstaat Paraná in Brasilien.

2. Untersuchungsgebiet und Problemstellung

Das ca. 84 km² große Einzugsgebiet des Passaúna liegt im Bundesstaat Paraná in Brasilien in den Subtropen bei ca. 25° S und 49° W (Abbildung 1). Die Jahresmitteltemperatur liegt bei ca. 17,3°C, der mittlere Jahresniederschlag beträgt ca. 1 500 mm. Somit unterscheidet sich das Einzugsgebiet klimatisch deutlich von den üblicherweise mit LARSIM simulierten Einzugsgebieten.

Die Funktionsweise, die Modellstruktur und die Datenerfordernisse für LARSIM-WHM sind in LEG (2019) detailliert beschrieben. Für den Aufbau und Betrieb eines LARSIM-WHM in einem neuen Gebiet müssen zum einen grundlegende Geo-Daten für die Erstellung sowie zum anderen hydro-meteorologische Daten für den Modellantrieb zur Verfügung stehen. Im Fall des Passaúna konnten die hydro-meteorologischen Daten von regionalen Behörden und Forschungseinrichtungen eingeholt werden (z. B. Abflussdaten für die vier Pegel in Abbildung 1), weshalb hier auf diesen Aspekt nicht genauer eingegangen wird.

Für die Aufstellung eines Modells müssen die hydrologisch relevanten Gebietsdaten aus entsprechenden Geo-Datensätzen abgeleitet werden. Eine wesentliche Grundlage bilden

dabei zahlreiche aus der Topographie ableitbare Gebietsinformationen (z. B. Teileinzugsgebiete, Höhenlagen usw.). Diese Grundlagen können aus einem digitalen Höhenmodell (DHM) abgeleitet werden. Die Fließvernetzung, Flusslängen und -gefälle können ebenfalls aus dem DHM ermittelt werden, im Idealfall steht zur Bestimmung dieser Größen jedoch eine realitätsnahe, digitale Gewässerkarte zur Verfügung. Aufgrund der weltweit guten Verfügbarkeit von DHM ist die Datenverfügbarkeit zur Ableitung der Grundstruktur selten limitierend. So konnte auch für Passaúna auf ein 10 m DHM und ein reales, digitalisiertes Flussnetz zurückgegriffen werden.

Die Simulation von Evapotranspiration, Bodenwasserhaushalt und Abflussbildung erfolgt in LARSIM-WHM auf der Ebene von (räumlich hoch aufgelösten) Hydrotopen. Zur Abgrenzung der Hydrotopen und deren räumlich differenzierten Parametrisierung sind Landnutzungs- und Bodeninformationen notwendig. Entsprechend räumlich differenzierte Landnutzungs-klassifikationen sind häufig verfügbar oder können aus Fernerkundungsdaten weltweit abgeleitet werden, so auch für Passaúna. Um die Berechnung der Verdunstung zu parametrisieren, müssen für diese Landnutzungs-klassen jedoch auch regions-spezifische Informationen zum Jahresgang von Albedo und Blattflächenindex (LAI) vorliegen. Solche Daten lagen für Passaúna nicht vor und limitieren die Übertragbarkeit von LARSIM auch für andere Regionen. Die erforderlichen bodenphysikalischen Informationen können in Deutschland aus vorliegenden digitalen Bodenkarten der Landesämter abgeleitet werden. Für Passaúna lagen keine direkt nutzbaren Bodenkarten vor, was erfahrungsgemäß auch für viele andere Regionen der Welt nicht der Fall ist.

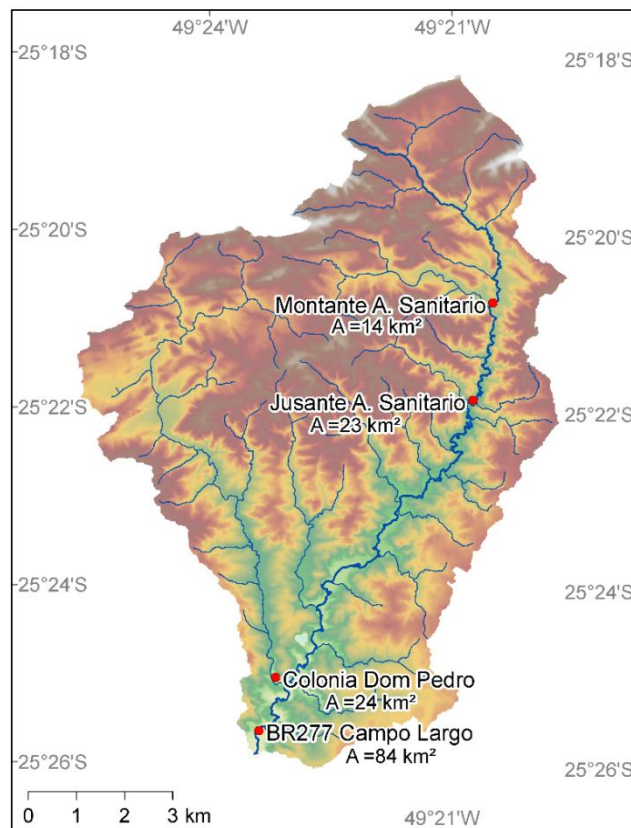


Abb. 1: Übersichtskarte des Oberlaufs des Passaúna mit verwendeten Abflusspegeln und deren Einzugsgebietsgrößen.

Die mangelnde Verfügbarkeit von jahreszeitlich differenzierten Daten zu Albedo und LAI sowie von flächendifferenzierten bodenphysikalischen Eigenschaften stellt somit ein häufiges Problem für die Übertragbarkeit von LARSIM-WHM auf Regionen außerhalb Mitteleuropas dar. Nachfolgend soll daher am Beispiel des Passaúna verdeutlicht werden, wie diese Hemmnisse der Übertragbarkeit angegangen werden können.

3. Vorgehen bei der Parametrisierung von Verdunstung und Bodenmodul

3.1 Ableitung der Verdunstungsparameter Albedo und LAI

Der benötigte Jahresgang der Parameter Albedo und LAI für definierte Landnutzungsklassen wurde anhand von Fernerkundungsdaten bestimmt. Dabei bestand die Anforderung, ein relativ einfaches Verfahren zu entwickeln, welches möglichst weltweit anwendbar ist. Als Datengrundlage wurden für beide Parameter Sentinel-2-Daten verwendet. Sentinel-2 ist eine Konstellation aus zwei baugleichen Satelliten, die in 13 Bändern des sichtbaren und infraroten Spektrums Bilddaten mit Bodenauflösungen von 10 m bis 60 m liefert. Die Wiederkehrrate der Konstellation beträgt ≤ 5 Tage und ermöglicht so die Abbildung des Jahresgangs von Landoberflächenparametern. Abhängig von der Wolkensituation reduziert sich die tatsächliche Verfügbarkeit valider Eingangsdaten. Die je Einzelszene durchgeführte Umrechnung spektraler Oberflächenreflektanzen in Albedowerte (Land Surface Shortwave Broadband Albedo) erfolgt auf Basis empirisch ermittelter Koeffizienten (Liang 2001). Anschließend erfolgt eine Korrektur systematischer Abweichungen zu räumlich und zeitliche korrespondierenden Albedowerten des 500 m auflösenden MODIS-Produkts MCD43 mittels Angleichung über die Bildstatistik. Die Umrechnung der Einzelszenen in LAI-Werte erfolgt durch Anwendung eines Neuronalen Netzwerks (Weiss et al. 2002). Das Netzwerk ist auf einem simulierten, die globalen Klimazonen und Vegetationstypen repräsentierenden Datensatz trainiert und daher global anwendbar. Die aus Einzelszenen abgeleiteten Albedo- und LAI-Werte werden zu monatlichen Medianwerten aggregiert.

3.2 Auswahl und Parametrisierung des Bodenmoduls

Der Bodenspeicher spielt eine entscheidende Rolle im WHM, da er zum einen regelt, wie viel Wasser für die Evapotranspiration zur Verfügung steht und zum anderen die Aufteilung des Wasserdargebots in Abflusskomponenten bestimmt. Bei der Abbildung der Prozesse im Boden besteht grundsätzlich ein Spannungsfeld zwischen einer möglichst präzisen Abbildung der realen boden-physikalischen Prozesse und der Verfügbarkeit der hierfür benötigten, teils kleinräumig variablen Parameterwerte. In LARSIM können je nach Datenverfügbarkeit und/oder Fragestellung verschiedene Grundannahmen und Berechnungsanforderungen hinsichtlich des Bodenmoduls ausgewählt werden. Im einfachsten Fall wird zur Parametrisierung einzig ein Gesamtspeichervolumen des Bodens verwendet. Die komplexeste Berechnungsanforderung berücksichtigt bis zu 15 Parameter. Zwischen diesen beiden Extremen sind zahlreiche modulare Abstufungen unterschiedlicher Komplexität möglich (LEG 2019). Für den Passaúna lagen keine flächendeckenden, direkt oder indirekt nutzbaren bodenhydrologischen Informationen vor. Durch UFPR und IWG/KIT wurden in zwei Messkampagnen Bodenproben erhoben und analysiert. Diese ermöglichen eine plausible Abschätzung des Gesamtporenvolumens sowie dessen Aufteilung in nutzbare Feldkapazität und Luftkapazität.

Daher wird zur Parametrisierung des Bodens vom modularen Aufbau von LARSIM Gebrauch gemacht und ein relativ einfaches Modul ausgewählt, welches lediglich anhand des Gesamtporenvolumens und dessen Aufteilung in Grob- und Mittelporen parametrisiert wird. Auch unter Zuhilfenahme von Hintergrundinformationen wie Bodenkarten und geologischer Karten erlauben die verfügbaren Bodenanalysen keine Ableitung einer räumlich differenzierten Parametrisierung des Bodenmoduls. Daher wurden anstatt der üblichen flächendifferenzierten Parametrisierung einheitliche Parameterwerte für alle Hydrotope des Einzugsgebiets verwendet.

4. Ergebnisse

Die Kalibrierung des Abflusses erfolgt anhand eines vierjährigen Zeitraums zunächst für den Auslasspegel BR277-Campo Largo (Abbildung 1). Das kalibrierte Modell ergibt an diesem Pegel für alle verwendeten Gütekriterien gute Ergebnisse (Tabelle 1, „Sim 1“). Die Übertragung des Modells auf das Einzugsgebiet des Passaúna unter Nutzung der Verdunstungsparameter aus Fernerkundungsdaten und der vereinfachten Bodenparametrisierung ist somit prinzipiell erfolgreich. Allerdings legt die Überprüfung der erzielten Ergebnisse an den drei Oberliegerpegeln nahe, dass eine separate Kalibrierung für diese Pegel zu weiteren Verbesserungen in deren Abflusssimulation führen könnte. Dies impliziert, dass die verwendete flächendifferenzierte Parametrisierung (topologische Gebietsdaten und Landnutzung) nicht ausreicht, um Unterschiede in der hydrologischen Reaktion der Teileinzugsgebiete abzubilden. Die separate Kalibrierung der Oberliegerpegel erbringt an allen Oberliegerpegeln sowie am Auslasspegel eine Verbesserung im Vergleich zur einheitlichen Kalibrierung. Die Simulation des Gesamtabflusses im Gewässer gelingt mit der separaten Kalibrierung an allen Pegeln und für alle Abflussbereiche gut (Tabelle 1, „Sim 2“).

Tab. 1: Ergebnisse der Kalibrierung an vier Pegeln. „Ideal“ bezeichnet den jeweiligen Referenzwert, d.h. für Gütemaße den besten theoretische erreichbaren Wert, für alle anderen Kriterien den anhand der Messwerte bestimmten Wert. „Sim 1“ bezeichnet die Simulationsergebnisse unter Nutzung einheitlicher Kalibrierparameter für das gesamte Gebiet. „Sim 2“ bezeichnet die Simulationsergebnisse nach der separaten Kalibrierung aller Pegel.

		r^2 [-]	NSE [-]	NSE_In [-]	Bilanz [-]	MNQ [m ³ /s]	MQ m ³ /s	MHQ m ³ /s	BFI -
Montante A. Sanitário	Ideal	1.00	1.00	1.00	1.00	0.16	0.35	4.2	0.64
	Sim 1	0.69	0.66	0.70	0.97	0.15	0.34	2.4	0.62
	Sim 2	0.70	0.66	0.77	0.98	0.17	0.35	2.5	0.68
Jusante A. Sanitário	Ideal	1.00	1.00	1.00	1.00	0.29	0.55	6.5	0.63
	Sim 1	0.68	0.67	0.65	1.03	0.24	0.57	4.1	0.61
	Sim 2	0.68	0.66	0.72	1.01	0.28	0.55	4.4	0.65
Colonia Dom Pedro	Ideal	1.00	1.00	1.00	1.00	0.27	0.67	6.5	0.54
	Sim 1	0.73	0.63	0.51	0.81	0.20	0.53	4.2	0.61
	Sim 2	0.73	0.69	0.68	0.98	0.26	0.64	5.5	0.58
BR277 - Campo Largo	Ideal	1.00	1.00	1.00	1.00	0.67	2.01	16.4	0.56
	Sim 1	0.79	0.75	0.77	0.99	0.73	1.99	15.1	0.57
	Sim 2	0.80	0.77	0.80	1.00	0.76	1.99	15.2	0.58

5. Diskussion und Schlussfolgerungen

Die durchgeführten Arbeiten zeigen, dass das Wasserhaushaltsmodell LARSIM prinzipiell für eine Übertragung auf Gebiete mit veränderter Datenlage und anderen klimatischen Bedingungen geeignet ist. Hinsichtlich der Datenlage ist davon auszugehen, dass die Verfügbarkeit der jahreszeitlich differenzierten Verdunstungsparameter LAI und Albedo und das Fehlen bodenhydrologischer Informationen wie im Passaúna Einzugsgebiet weltweit häufig limitierend für die Übertragbarkeit sind. Für das Passaúna-Einzugsgebiet wurden Vorgehensweisen zum Umgang mit diesen Limitierungen entwickelt, welche auch in anderen Gebieten anwendbar sind. Die erzielten Simulationsergebnisse zeigen, dass die Übertragung von LARSIM auf das Einzugsgebiet des Passaúna unter Nutzung dieses Vorgehens erfolgreich ist. Sie verdeutlichen aber auch, dass die verwendete räumlich einheitliche Parametrisierung des Bodenmoduls Einschränkungen in der Simulationsqualität zur Folge hat. Offenbar wirkt die separate Kalibrierung der Teileinzugsgebiete v.a. als (Teil-) Kompensation der fehlenden Flächendifferenzierung der Bodendaten. In einem zu Vergleichszwecken hinzugezogenen Untersuchungsgebiet in Deutschland konnte gezeigt werden, dass bei optimaler Datenverfügbarkeit (v. a. Flächendifferenzierung der Bodendaten) relevante Unterschiede in der flächenhaften Abflussreaktion einzelner Teileinzugsgebiete auch ohne separate Kalibrierung simuliert werden können (Krumm & Haag 2019). Eine solche flächendifferenzierte Parametrisierung auf Basis physikalischer Daten ist bei entsprechender Datenlage der pegelspezifischen Kalibrierung vorzuziehen, weil die separate Kalibrierung selbst bei guten Ergebnissen an den Pegeln zu einer räumlichen „Verwischung“ der flächenhaften Modellergebnisse führen kann. Im Gegensatz dazu ist davon auszugehen, dass eine räumlich differenzierte physikalisch-basierte Parametrisierung zur realitätsnahen Flächendifferenzierung der Abflussreaktion führt und somit auch die Extrapolationsfähigkeit des Modells (z.B. für Szenarienberechnungen) erhöht.

Danksagung Die vorliegende Arbeit wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Fördermaßnahme GRoW gefördert (Förderkennzeichen: 02WGR1431F).

Literatur

- Bremicker, M., Brahmer, G., Demuth, N., Holle, F.-K., Haag, I., 2013. Räumlich hoch aufgelöste LARSIM Wasserhaushaltsmodelle für die Hochwasservorhersage und weitere Anwendungen. KW Korrespondenz Wasserwirtschaft, 2013/6(9), 509-514.
- Krumm, J., Haag, I. 2019. Multikriterielle Analyse eines Wasserhaushaltsmodells unter Berücksichtigung der Unsicherheit der Datengrundlage. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 41.19 (im Druck).
- LEG, 2019. Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele, <http://www.larsim.info/dokumentation/LARSIM-Dokumentation.pdf>, 04.02.2019.
- Liang, S., 2001. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I. Remote Sensing of Environment, 76(2), 213–238. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00205-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00205-4)

Weiss, M., Baret, F., Leroy, M., Hautecœur, O., Bacour, C., Prévot, L., Bruguier, N., 2002. Validation of neural net techniques to estimate canopy biophysical variables from remote sensing data. *Agronomie*, 22(6), 547–553. <https://doi.org/10.1051/agro:2002036>

A conceptual framework: Citizen Science for flood early warning system and risk awareness - A case study in Ghana

Adrian Delos Santos Almoradie, Mariana Madruga de Brito, Mariele Evers

Summary

The frequency and intensity of floods have been increasing for the past decades. This has been mostly attributed to climate change and anthropogenic activities such as the change of land-use and urbanization. In order to inform and prepare the people on the coming floods and mobilize evacuation and relief efforts decision makers often rely on flood early warning systems (FEWS). However, in many areas, especially in developing countries, FEWS provide unreliable predictions due to limited monitoring stations. Several studies indicate that Citizen science (CS) through crowdsourcing has the potential to greatly improve forecast reliability and increase the awareness of affected populations. CS data can help to create new hydrological knowledge, especially in relation to the characterization of process heterogeneity, remote regions, and human impacts on the water cycle. Nevertheless, there are still many challenges in CS, such as data uncertainty from social sensors and how to keep a continuous engagement. To address these challenges, this paper presents a conceptual framework of an integrated decision support tool that employs CS for FEWS and risk awareness in Ghana.

1. Introduction

In flood risk management, FEWS aims to provide a timely and accurate river water level forecast to the constituents and decision makers for them to take the most appropriate actions to mitigate the impact of floods (Todini et al., 2005). However, in many countries, FEWS have become ineffective in providing accurate and timely information due to imprecise data. In-situ hydro-meteorological data needed as input to FEWS are becoming increasingly unreliable due to a general lack of maintenance and subsequent destruction or malfunction of these measuring devices (i.e., physical sensors). This deficiency reasonably affects the preparedness of emergency responders in safeguarding lives and properties in the event of floods. In-situ data can be complemented by freely available earth observation data (e.g. TRMM – Tropical Rainfall Measuring Mission) to fine tune flood forecasting models. However, these earth observation data also have limitations such as coarse spatial and temporal resolution.

The growth and advancement of Information and Communications Technology (ICT) mobile applications for the past decade now allow individuals to engage in sharing information on environmental issues, providing real-time location-based data. Recently, it is widely encouraged to involve individuals to act as social sensors by providing hydrological data such as precipitation or water level to decision makers (Buytaert et al., 2014). Hence, a number of research projects on flood forecasting are now looking into crowdsourcing as a mean to improve the prediction reliability. For example, Mazzoleni (2016) assimilated uncertain crowdsourced data into hydrological and hydraulic models to improve flood prediction. Other examples of water-related crowdsourcing include the Amateur Weather Network (Gharesifard and When, 2016) and CrowdHydrology (Lowry and Fienen, 2013).

One of the main limitations of water-related crowdsourcing is that, in long-term, these initiatives are not sustainable because of the lack of motivation of individuals to participate. Moreover, the use of CS observations has also its downside such as its data accuracy (e.g. error in reading the water level). To address these challenges, this paper presents a concep-

tual framework of a FEWS for Ghana that takes into consideration the issue of sustainable engagement of citizens and reduction of data uncertainty from social sensors.

2. Case Study

In West Africa, Ghana (Fig. 1) is one of the countries most prone to floods (World Bank, 2011; Nansam-Aggrey, 2015). High rainfall variability and extreme rainfall events have been the main cause of these floods. However, human activities also modify the water cycle through changing land cover, land use, building dams, water extraction etc., which collectively have impacts the river flow regimes and storage in floodplains. These floods severely impact livelihoods, food security, and ecological systems.

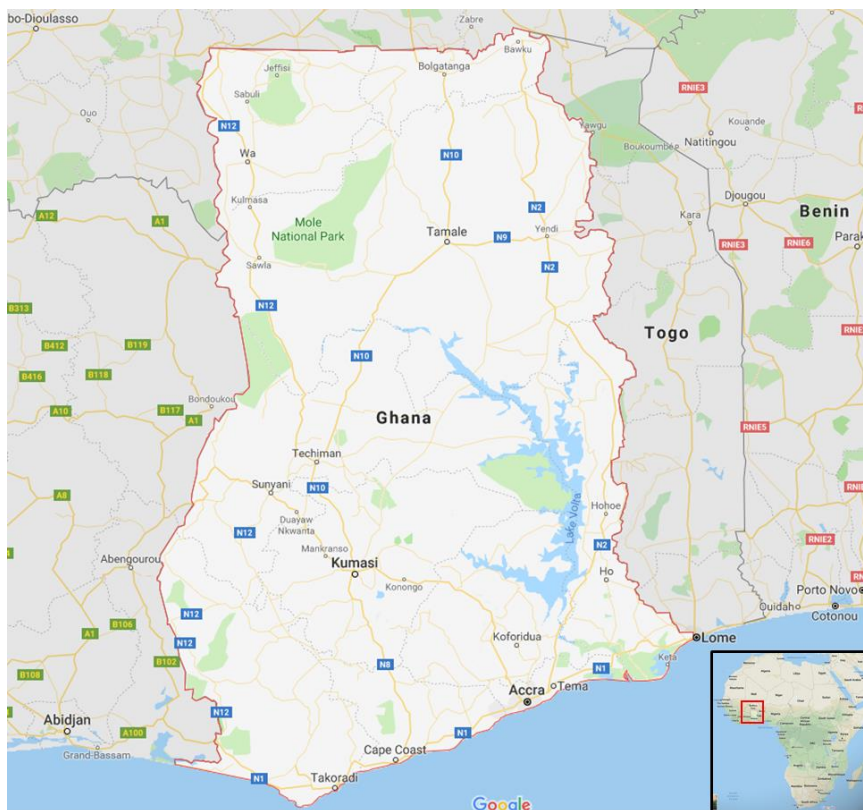
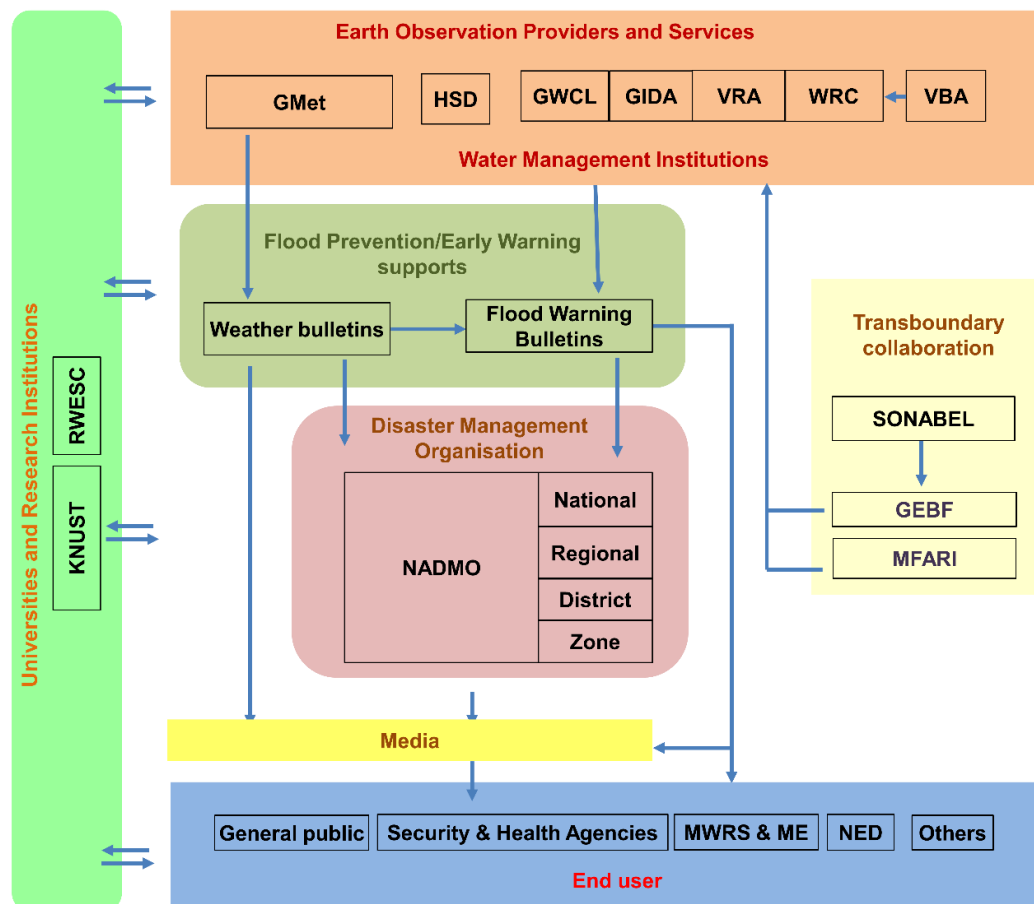


Fig. 1: Location of the study area, Ghana, West Africa

In the past couple of years, Ghana experienced severe weather events that resulted in devastating floods. A flood in 2017 impacted the country's northern and southern parts, affecting about 1 million people (IFRC, 2018). In the year 2018, high-intensity rainfall combined with water releases from the Bagre Dam in Burkina Faso flooded areas in the north affecting 100,000 people, with 34 human lives lost, and destroyed 196 km² of farmland (FLOODLIST 2018). The increasing urbanization, land-use, and climate change presents a major challenge in Ghana in terms of forecasting, emergency response, provision of basic infrastructure and measures to deal with floods.

Ghana's government has initiated actions on several fronts to develop strategies and Ghana's institutional landscape registered an impressive number of organizations interacting and dealing with flood-related disaster prevention and management including a FEWS. Ghana

has an existing FEWS however it remains ineffective because of data scarcity. Fig. 2. shows Ghana's institutional interlinkages in the management of flood and its FEWS.



WRC: Water Resources Commission
 GMet: Ghana Meteorological Agency
 HSD: Hydrological Services Department
 VRA: Volta River Authority
 GIDA: Ghana Irrigation Development Authority
 GWCL: Ghana Water Company Limited
 NADMO: National Disaster Management Organization
 GEBF: Ghana Embassy in Burkina Faso

KNUST: Kwame Nkrumah University of Science and Technology
 RWESC: Regional Water and Environmental Sanitation Centre
 VBA: The Volta Basin Authority
 MWRS: Ministry of Water Resources and Sanitation
 MFARI: Ministry of foreign affairs and Regional Integration
 ME: Ministry of energy
 Others: includes NGO, Projects, etc.

Fig. 2: Flood management flow chart in Ghana. The current FEWS and Disaster risk maps were developed by NADMO to the benefit of 5 pilot districts. (Source: WRC and NADMO)

In order to provide new insights into the factors that contribute to the severity of flood impacts in Ghana, we conducted a series of workshops and surveys with 61 key stakeholders and experts in the field of flood risk management (FRM). Results showed that the main hindrances in FRM in Ghana include: (1) lack of relevant data, (2) inefficient information flow, (3) low community awareness, preparedness and coping capacity, (4) few incentives for communities to engage in flood resilience planning, and (5) lack of flood early warning systems (FEWS).

To address these gaps, the concept of citizen science through crowdsourcing could be used. Integrating citizen's local knowledge with scientific facts can greatly improve the FEWS, support FRM mapping efforts and increase citizens flood risk awareness. Crowdsourced infor-

mation can be on e.g. water levels, flooded areas, emergency situations, state of critical infrastructures and other elements at risk.

3. Decision Support System (DSS) – FEWS Conceptual framework

This section contains the definitions of physical and social sensors used in this paper. Furthermore, it also presents the integration of Physical-Remote-Social sensors for FEWS in Ghana.

3.1 Physical and Remote Sensors

Physical sensors such as automatic devices to measure water level, pressure, temperature, and precipitation are important for flood forecast modeling. These are used to calibrate, validate and in real-time update the flood models to make predictions on water levels. However, in many countries, there only a few numbers of physical sensors that are operational, hence prediction capability of the models are unreliable. Factors that affect the operational sustainability of physical sensors are proper maintenance and personnel which can be very expensive.

One could also integrate freely available remote sensors (Earth observation data) e.g. coming from TRMM. Studies show that its integration in the model could lead to improved forecast. However, there remains a number of challenges in its integration, such as inconsistency in model prediction because of (1) spatial and temporal resolution, (2) uncertainty in the remotely sensed product and (3) degradation and overcorrection in its assimilation with physical sensors (Li et al., 2016). Moreover, the use of remotely sensed data is not instantaneous and it requires expertise to analyze the data, hence this could affect the lead time prediction.

3.2 Social Sensors

Social sensors are citizens that collect data using a sensor or by communicating observations and data through the use of mobile devices such as smartphones (Ciravegna et al., 2013). Social sensors have a huge potential to improve flood forecasting, however, it remains elusive to continuously engage the citizens in CS. Engagement and sharing of data are influenced by (1) individual attitude, (2) social pressure and (3) perceived control. Factors that motivate the attitudes of the individual to share data are the gains and/or losses that they incur in sharing data (tangible personal outcomes) and their inner satisfaction in sharing personally collected data (intangible personal outcomes) (Gharesifard and When, 2016). A more positive attitude, stronger positive social pressure, and greater perceived behavior could lead to increased motivation to share data.

Most often crowdsourcing applications use gamification features as a motivation to sustain a continuously engagement. Gamification features can be tangible and intangible. For example, these can be the use of awards, badges, ranking, and ratings to be competitive in sharing data or information. However, recent studies show' that gamification may not be a significant motivating factor in collecting environmental data (Skarlatidou et al., 2019).

Another challenge in CS is the difficulty of social sensors to directly infer complex nature in measurement. Mobile smartphones technological advancement should be able to offer appli-

cations that will simplify the measurement of non-trained social sensors through the use of Artificial Intelligence imaging techniques.

3.3 Conceptual framework

The conceptual framework presented in Fig. 3. will integrate the data from Physical, Remote and Social sensors using the Kalman filter, nudging or direct insertion techniques. These techniques are promising to use as presented in the study of Mazzoleni (2016) on assimilating CS data with flow data. However, real-time and real-life CS observations by citizens were not considered in its implementation in the study.

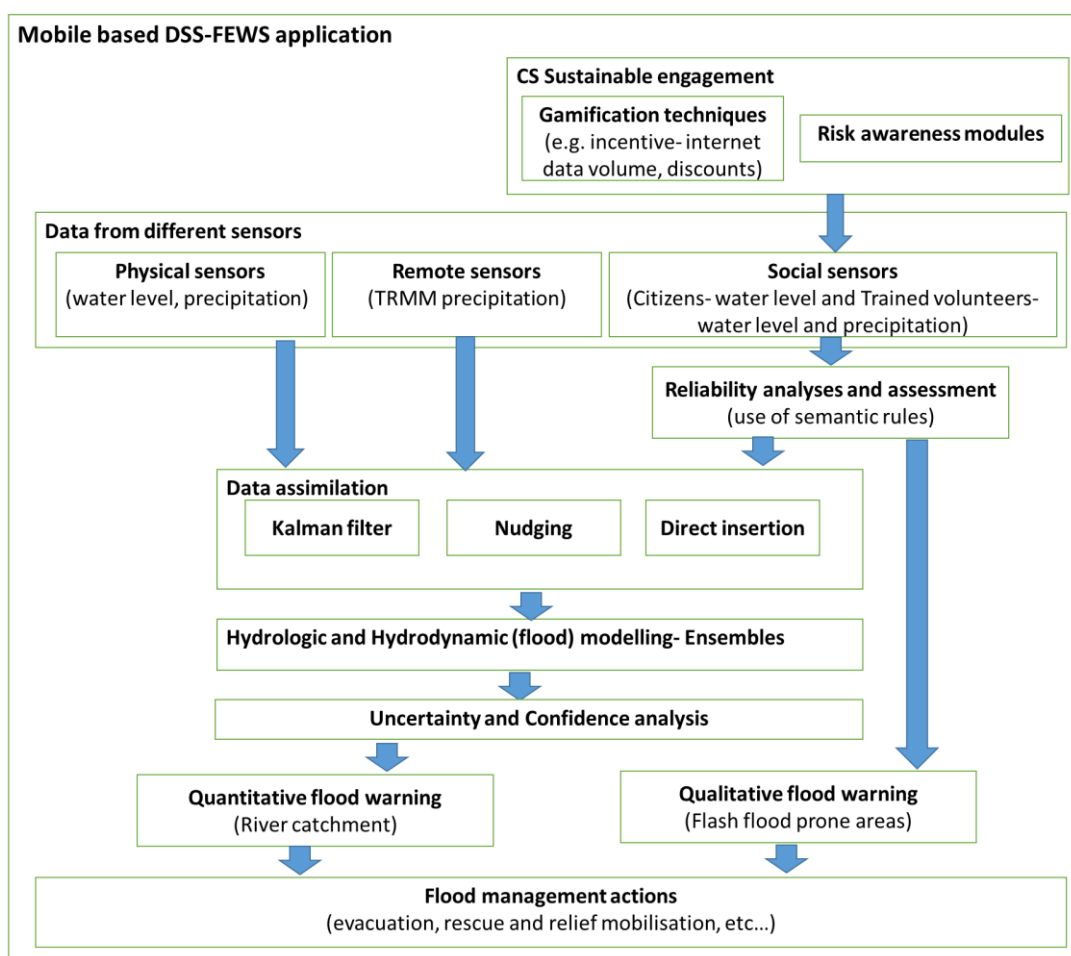


Fig. 3: Conceptual framework DSS-FEWS

The innovation of this framework is the integration of these different sensors, the use of incentive gamification techniques and a risk awareness raising module to motivate citizens in Ghana to share data and information.

Real-time reliability matrix of social sensors will be also developed with the use of semantic rules by comparing measurements in the pre-defined time window. This filter of using a reliability matrix will be helpful for areas that are prone to flash floods since usually in these areas the time window in giving out warning is very limited. Efficient uncertainty and confidence analysis techniques will also be implemented to determine the model's predictive accuracy.

Pareto Optimal Solutions Visualization Techniques will be explored for its visualization to support decision making. The use of Artificial Intelligence Imaging technique to support non-trained users in measuring will also be explored.

4. Outlook

It is envisaged that the framework will help improve Ghana's FEWS by developing multi-sensor DSS-FEWS applications that are robust and sustainable. The design will be developed together with stakeholders, integrating the user's needs. Additionally, to enhance the reliability of citizen science data, a training module will be developed to tap citizens as data providers and to act as knowledge multipliers. With our methodological approach, we seek to make a contribution to the challenges in acquiring information about flood risk in data-scarce environments using a generally applicable solution. Moreover, the developed tool is expected to increase participants risk awareness and provide them with an opportunity to communicate their concerns and views on the actions and response to floods.

Literature

- Buytaert, W., Zulkafli, Z., Grainger, S., Acosta, L., Alemie, T. C., Bastiaensen, J., De Bievre, B., Bhusal, J., Clark, J., Dewulf, A., Foggin, M., Hannah, D. M., Hergarten, C., Isaeva, A., Karpouzoglou, T., Pandeya, B., Paudel, D., Sharma, K., Steenhuis, T., Tilahun, S., Van Hecken, G., Zhumanova, M., 2014. Citizen science in hydrology and water resources: opportunities for knowledge generation, ecosystem service management, and sustainable development, *Front. Earth Sci.* 2, 1–21.
- Ciravegna, F., Huwald, H., Lanfranchi, V., Wehn de Montalvo, U., 2013. Citizen observatories: the WeSenselt vision, Florence, Italy.
- FLOODLIST., 2018. Ghana – Dozens Killed by Flooding in Northern Regions. <http://floodlist.com/africa/ghana-floods-northern-regions-september-2018>. [Accessed 12.02.2018].
- Ghariesifard, M., Wehn, U., 2016. To share or not to share: Drivers and barriers for sharing data via online amateur weather networks, *Jornal of Hydrology* 535, 181–190.
- IFRC., 2018. Emergency Plan of Action final report - Ghana: floods.
- Li, Y., Grimaldi, S., Walker, J.P., Pauwels, V.R.N., 2016. Application of remote sensing data to constrain operational rainfall-driven flood Forecasting: A Review. *Journal of Remote Sensing*, 8, 456.
- Mazzoleni, M., 2016. Improving Flood Prediction Assimilating Uncertain Crowdsourced Data into Hydrologic and Hydraulic Models, CRC Press / Balkema - Taylor & Francis Group.
- Nansam-Aggrey, F.K.N., 2015. Governance of Climate Change Adaptation for Flooding In Accra: The Role of National Disaster Management Organization. University of Rotterdam.
- Skarlatidou, A., Hamilton, A., Vitos, M., Haklay, M., 2019. What do volunteers want from citizen science technologies? A systematic literature review and best practice guidelines. *Journal of Science Communication* 18(01).
- Todini, E., Alberoni, P., Butts, M., Collier, C., Khatibi, R., Samuels, P., Weerts, A., 2005. ACTIF best practice paper—understanding and reducing uncertainty in flood forecasting,

in P. Balabanis, D. Lumbroso, P. Samuels International conference on innovation, advances and implementation of flood forecasting technology, Troms, Norway.
World Bank., 2011. Disaster Risk Management Programs for Priority Countries. World Bank.

Der Einfluss von Langzeit-Autokorrelationen auf die Unsicherheit in der Trendanalyse hydrologischer Zeitreihen

Thomas Recknagel, Jens Wilhelmi, Winfried Willems, Jörg Belz, Enno Nilson, Peter Krahe

Zusammenfassung

Langzeit-Autokorrelationsstrukturen in beobachteten und simulierten hydrometeorologischen Zeitreihen haben einen Einfluss auf die Bestimmung der Unsicherheit in Trendanalysen. Die Bestimmung des Hurst-Koeffizienten von beobachteten und simulierten Abflusszeitreihen mittels Detrended Fluctuation Analysis und eines auf einer FARIMA-Schätzung basierenden Algorithmus zeigt, dass die Langzeit-Autokorrelation in den mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM-ME simulierten Zeitreihen möglicherweise noch nicht ausreichend nachgebildet wird.

1. Einleitung

Regionale hydrologische Systeme reagieren unterschiedlich auf großräumige klimatische Veränderungen. Um potenzielle Veränderungen der Wasserhaushaltsgrößen infolge verschiedener angenommener Klimaszenarien zu untersuchen, wird an der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) u.a. das Wasserhaushaltsmodell LARSIM-ME (BfG, 2019) eingesetzt. Eine Grundvoraussetzung, um auf Basis der Modellberechnungen belastbare Hinweise auf evtl. Trends im Abflussgeschehen und deren Signifikanz ableiten zu können, ist eine hinreichend korrekte Abbildung der wesentlichen hydrologischen Prozesse. Dazu zählt auch der nicht trivial überprüfbare Aspekt, dass das verwendete Wasserhaushaltsmodell Zeitreihen erzeugen sollte, deren Langzeit-Persistenz denen der gemessenen Zeitreihen entspricht.

2. Langzeit-Autokorrelation

Geowissenschaftliche Zeitreihen weisen häufig eine Langzeit-Autokorrelation auf. Dabei fällt die Autokorrelationsfunktion der Zeitreihen nicht exponentiell ab, sondern lässt sich durch ein Potenzgesetz der Form $\rho(k) \sim k^{2d-1}$ mit dem fraktionalen Exponenten d beschreiben. Dieses auch Joseph-Effekt genannte Phänomen wurde erstmals von Harold Edwin Hurst im Jahr 1951 an der Zeitreihe der Wasserstände des Nils nachgewiesen. Hurst hatte zur Berechnung der nötigen Kapazität des Assuan-Stausees die Rescaled-Range-Analyse entwickelt und gezeigt, dass für eine Zeitreihe der Länge n gilt: $\log(r_n) \approx H \log(n/2)$. Dabei ist $H = d + 0,5$ der Hurst-Koeffizient. Während für stationäre Prozesse definitionsgemäß $H = 0,5$ zu erwarten ist, ergaben Hurst's Berechnungen für viele Zeitreihen $H > 0,5$, also Langzeitpersistenzen. Obwohl schon in einem zusammen mit Hursts Artikel (Hurst, 1951) veröffentlichten Kommentar die Nichtstationarität der zugrundeliegenden Prozesse als Ursache angenommen wurde (*“Because of the long-term cyclic effects of nature, observed data do not check the theoretical equation”*) und auch Hurst selbst demonstriert hatte, dass Zufallsprozesse mit Sprüngen im Erwartungswert Reihen mit $H > 0,5$ erzeugen können, fokussierte sich insbesondere der aufkommende Zweig der stochastischen Hydrologie auf andere Erklärungsansätze. Dazu trug maßgeblich das von Mandelbrot und Van Ness (1968) vorgeschlagene Modell der fraktionalen Brownschen Bewegung bei. Eine mit diesem Modell generierte Zeitreihe ist selbstähnlich und weist Interdependenz zwischen zeitlich beliebig weit auseinanderliegenden Werten auf, was als unendliches Gedächtnis (infinite memory) bezeichnet

wurde. Klemes (1974) bemängelte, dass es keinen physikalischen Mechanismus gäbe, auf dem eine beliebig lange Fernwirkung basieren könne, und konstatierte, dass geophysikalische Prozesse ohnehin höchstens in relativ kurzen Zeitspannen annähernd stationär seien. Ein weiterer Aspekt ist, dass Aussagen über Korrelationen immer nur über die zeitliche Skala der vorliegenden Zeitreihe getroffen werden können. Ein theoretisches Verhalten darüber hinaus ist nicht gesichert ableitbar. Dass vermeintliche Persistenz häufig lediglich preasymptotisches Verhalten sein könnte, wurde von Salas (1979) vermutet. Ledvinka und Recknagel (2018) zeigten beispielhaft an langen quasinatürlichen Abflussreihen, dass dort der berechnete Hurst-Koeffizient mit zunehmender analysierter Reihenlänge abnimmt und auch bei maximaler Reihenlänge noch keine Konvergenz zu erkennen ist. Mittlerweile teilt laut Montanari (2003) die Mehrzahl der Hydrologen die Ansicht, dass der Hurst-Effekt durch eine komplexe Variabilität hydrologischer Prozesse auf verschiedenen Zeitskalen verursacht werde. Dass die Ursache von Langzeit-Autokorrelationen in hydrologischen Zeitreihen noch immer als eines der ungelösten Probleme der Hydrologie gilt (VCSS, 2018), ist darin begründet, dass eben diese Wirkmechanismen im Einzelnen noch nicht verstanden sind.

Zur Abschätzung der Signifikanz etwaiger Trends ist die Berücksichtigung von Langzeit-Autokorrelation bedeutsam, da diese einen Beitrag zur Ausprägung stochastischer Trends liefert. Ohne dessen Berücksichtigung wäre die Signifikanzschätzung u.U. erheblich verfälscht (Fehler 1. Art).

Eine Schwierigkeit bei der Bestimmung des p-Wertes liegt darin, anhand einer einzigen Zeitreihe die Verteilung aller theoretisch möglichen stochastischen Trends abzuschätzen. Wird die Standardabweichung dieser Verteilung beispielsweise um 50% unter- bzw. überschätzt, so ergeben sich, ausgehend von einem tatsächlichen p-Value von 0,05, stattdessen Werte von 0,191 bzw. 0,0033.

3. Bestimmung des Hurst-Koeffizienten

Im Rahmen einer von der BfG beauftragten Untersuchung (Willems, 2017) wurden auch verschiedene Schätzverfahren zur Bestimmung des Hurst-Exponenten verglichen: Rescaled-Range-Verfahren, Log-Log-Regression des Spektrums, Detrended Fluctuation Analysis (DFA), Maximum-Likelihood-, Whittle- und ein Wavelet-basierter Schätzer.

Dafür wurden mittels eines FARIMA-Modells synthetische Zeitreihen mit vorgegebenem Hurst-Koeffizienten erzeugt.

Für größere Stichprobenumfänge konnte der vorgegebene Hurst-Exponent mit der DFA-Methode am zuverlässigsten geschätzt werden.

Dabei erfolgte jedoch eine Überschätzung, wenn im FARIMA-Modell auch Kurzzeitkorrelationen (AR- und MA-Term) vorgegeben wurden.

Willems (2017) schlägt daher einen auf der Arbeit von Montanari (1997) aufbauenden Algorithmus vor, in dem im Rahmen einer kompletten FARIMA-Modellidentifikation die kurz- und langzeitkorrelierten Komponenten getrennt werden. Bei diesem mehrstufigen Verfahren erfolgt in einem ersten Schritt eine Vorab-Schätzung des Hurst-Koeffizienten auf Basis der DFA bzw. eines Wavelet-basierten Schätzers. Nachdem im nächsten Schritt die Kurzzeitkorrelationsstrukturen durch Anwendung eines fraktionalen Differenzenfilters abgetrennt wurden, erfolgt eine Identifikation der AR- und MA-Ordnungen mittels des BIC-Kriteriums. Ab-

schließlich erfolgt die endgültige Parametrierung des gesamten FARIMA-Modells mittels Maximum-Likelihood-Schätzung, wobei die zuvor identifizierten AR- und MA-Ordnungen zugrunde gelegt werden.

4. Fallstudie

Bei der Anwendung von Wasserhaushaltsmodellen für Abflussprojektionen ist es erforderlich, dass das verwendete Modell in der Lage ist, Abflusszeitreihen zu erzeugen, die den Messreihen strukturell ähneln. Neben anderen Kenngrößen kann die durch den Hurst-Koeffizient quantifizierbare Persistenz daher ein Gütemaß darstellen.

Des Weiteren können modulare physikalisch basierte Wasserhaushaltsmodelle auch Experimentierlabor sein, um die Auswirkung der Prozesse im Einzugsgebiet auf die Persistenz des Abflusses besser zu verstehen.

Im Rahmen dieses Beitrages wird beispielhaft für das kleine Einzugsgebiet des Pegels Elbersdorf (Wesenitz, Sachsen, AEO 278 km²) eine Bestimmung der Persistenz der modellantreibenden Größen Niederschlag, Temperatur und Globalstrahlung sowie des gemessenen sowie simulierten Gesamtabflusses vorgenommen. Dazu wurden zwei Modellläufe durchgeführt: ein Modelllauf für den Zeitraum 1951–2015 mit dem aus Beobachtungsdaten abgeleiteten Rasterprodukt HYRAS (z.B. Frick, 2018) sowie ein Modelllauf für den Zeitraum 1951 – 2090 mit meteorologischen Eingangsdaten, welche auf einer CMIP5-Klimaprojektion beruhen (Globalmodell: MPI-M-MPI-ESM-LR, Regionalmodell: MPI-CSC-REMO2009, Emissionsszenario: RCP26; siehe z.B. Giorgetta, 2013).

Das Einzugsgebiet wird im Modell aufgrund der notwendigen Abstraktion des Gewässernetzes durch sieben Rasterzellen der Größe 5x5 km² repräsentiert und liegt somit an der unteren Grenze dessen, was mit einem Wasserhaushaltsmodell dieser Skala sinnvoll simuliert werden kann. Die Nash-Sutcliffe-Effizienz für den auf HYRAS basierenden Modelllauf beträgt 0,59.

In Abbildung 1 sind die mittels DFA ermittelten Hurst-Koeffizienten für die auf das Einzugsgebiet bezogenen Größen Niederschlag, Lufttemperatur und Globalstrahlung sowie für den simulierten Gesamtabfluss dargestellt (Anstieg des rechten Astes der doppeltlogarithmisch aufgetragenen Fluktuationfunktion; grün: auf HYRAS-Daten bzw. auf HYRAS basierender Modelllauf, blau: Klimaprojektion bzw. Abflussprojektion, schwarz: gemessener Abfluss). Dabei wurden die meteorologischen Eingangsdaten nach dem Ansatz von McLeod (2013) desaisonalisiert.

Die Hurst-Koeffizienten wurden ebenfalls nach der Methode von Willems berechnet. Der Vergleich der Ergebnisse beider Methoden ist in Tabelle 1 dargestellt.

Es fällt auf, dass der beobachtete Abfluss eine deutlich höhere Langzeit-Autokorrelation aufweist als der mit Beobachtungsdaten angetriebene simulierte Abfluss. Die FARIMA-Schätzung nach Willems ergibt sogar, dass in den simulierten Abflussdaten kein fraktionaler Term, sondern lediglich Kurzzeit-Autokorrelationen auftreten. Die Analyse der Persistenz der meteorologischen Zeitreihen zeigt dagegen vergleichbare Ergebnisse zwischen der DFA und der Willems-Methode, wobei die Willems-Methode aus oben geschilderten erwartbaren Gründen den Hurst-Koeffizient meist etwas geringer schätzt als die DFA.

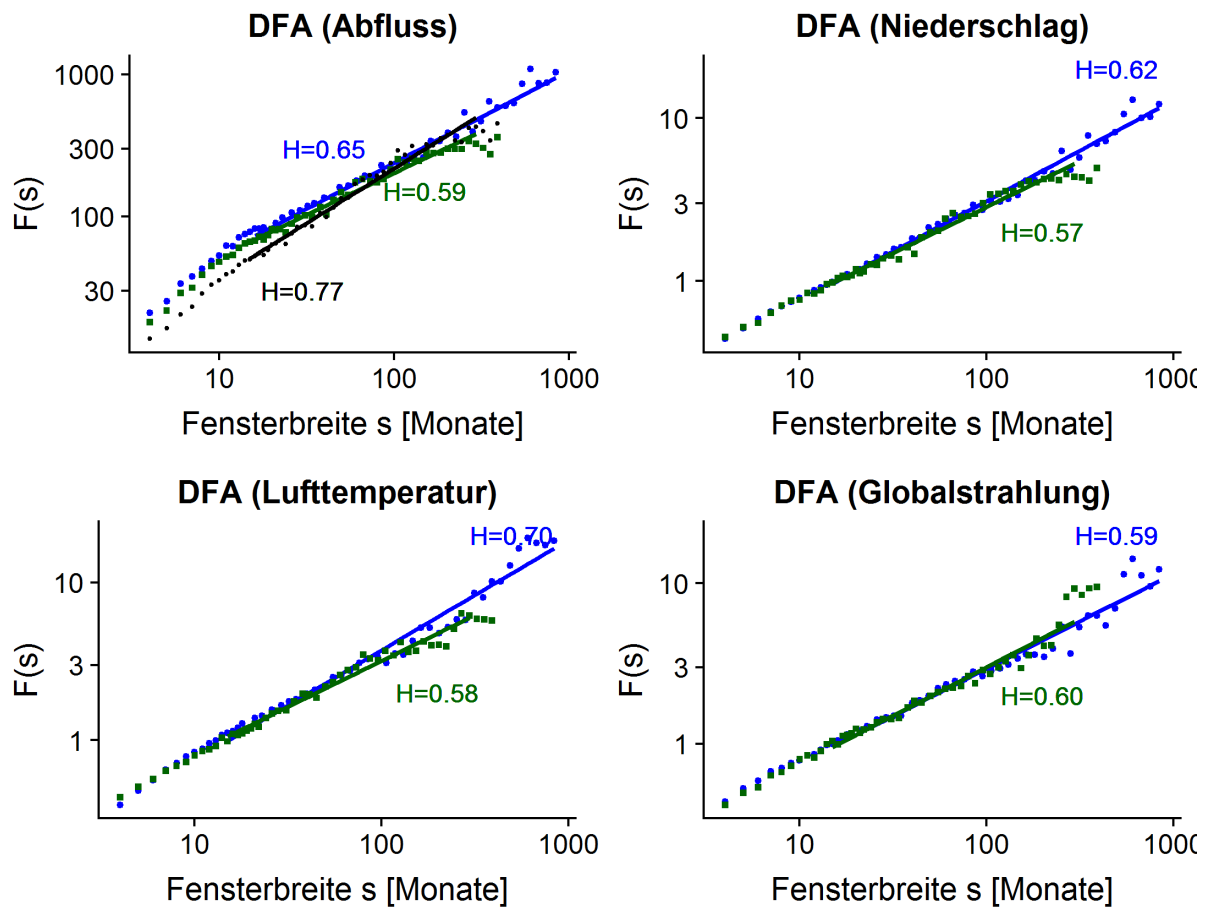


Abb. 6: Bestimmung des Hurst-Koeffizienten mittels DFA. Grün: aus Beobachtungsdaten abgeleiteter HYRAS-Datensatz. Blau: Klimaprojektion. Schwarz: beobachteter Abfluss.

Tab. 1: Vergleich der durch DFA und durch den Algorithmus von Willems bestimmten Hurst-Koeffizienten

	DFA	Willems
Q gemessen	0,77	0,70
Q (HYRAS)	0,59	(0,50)
Q (MPI)	0,65	(0,50)
T (HYRAS)	0,58	0,62
T (MPI)	0,70	0,65
N (HYRAS)	0,57	(0,50)
N (MPI)	0,62	0,56
Glob (HYRAS)	0,60	0,61
Glob (MPI)	0,59	0,56

5. Ausblick

In diesem Beitrag kann nur ein kurzer Einblick in die Untersuchungen zu Ursache von Langzeit-Autokorrelationen in hydrologischen und hydrometeorologischen Zeitreihen und deren Einfluss auf die Unsicherheit von Trendanalysen gegeben werden. Im Rahmen des Projektes Elberegime2100 erfolgt derzeit eine systematische Auswertung der Persistenz in Abflusszeitreihen des Elbe-Gebietes sowie bei Zeitreihen weiterer relevanter Größen des Wasserhaus-

haltes. Das dargestellte Beispiel hat gezeigt, dass es Anhaltspunkte gibt, dass das Wasserhaushaltsmodell LARSIM-ME bestimmte physikalische Prozesse, die zur Ausbildung von Persistenz führen, noch unzureichend nachbildet, obwohl die generelle Modellperformanz sehr zufriedenstellend ist. Diese Fragestellung sowie die Fragestellung, wie sich die Persistenz einzelner Klimaprojektionen unterscheidet und auf die jeweiligen Abflussprojektionen auswirkt, sind Beispiele für noch zu bearbeitende Forschungsfragen innerhalb des Projektes.

Literatur

- BfG, 2019. LARSIM-ME. Ein Wasserhaushaltsmodell für große Flussgebiete in Mitteleuropa. BfG-Bericht (in Vorbereitung).
- Frick, C., Steiner, H., Mazurkiewicz, A., Riediger, U., Rauthe, M., Reich, T., Gratzki, A., 2018. Central European high-resolution gridded daily data sets (HYRAS): mean temperature and relative humidity. *Meteorologische Zeitschrift*, 23(1), 15-32.
- Giorgetta, M. A., Jungclaus, J., Reick, C. H., Legutke, S., Bader, J., Böttinger, M., Glushak, K., 2013. Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 5(3), 572-597.
- Hurst, H. E., 1951. Long-term storage capacity of reservoirs. *Trans. Amer. Soc. Civil Eng.* 116, 770-799.
- Klemes, V., 1974. The Hurst Phenomenon: A Puzzle? *Water Resources Research* 10 (4)
- Ledvinka, O., Recknagel, T., 2018. Long-Term Persistence in Discharge Time Series of Mountainous Catchments in the Elbe River Basin. 8th Global FRIEND Water Conference, Beijing.
- Mandelbrot, B., Van Ness, J., 1968. Fractional Brownian Motions, Fractional Noises and Applications. *SIAM Review* 10 (4): 422–37.
- Montanari, A., Rosso, R., Taqqu, M., 1997. Fractionally differenced ARIMA models applied to hydrologic time series: Identification, estimation, and simulation. *Water resources research* 33 (5): 1035-1044.
- Montanari, A., 2003. Long-Range Dependence in Hydrology. In: *Theory and Applications of Long-Range Dependence*, edited by Paul Doukhan, Georges Oppenheim, and Murad S. Taqqu, 461–72. Boston, Massachusetts: Birkhäuser.
- Salas, J. D., Boes, D. C., Yevjevich, V., Pegram, G., 1979. Hurst Phenomenon as a Pre-Asymptotic Behavior. *Journal of Hydrology* 44 (1-2): 1–15.
- VCSS. 2018. Unsolved Problems in Hydrology (UPH). Outcomes of the Plenary Voting at the VCSS on 14 April 2018.
- Willems, W., Min, A., 2016. Praxisgerechte Detektion von Trends unter Berücksichtigung von Kurz- Und Langzeit-Autokorrelationsstrukturen. Ottobrunn: IAWG.

Langzeiteffekte großräumiger mittelalterlicher und neuzeitlicher Entwaldungen im Erzgebirge und Auswirkungen auf die Scheitelabflüsse von Hochwasserereignissen

Christian Reinhardt-Imjela, Rabea Imjela, Jens Bölscher, Achim Schulte

Zusammenfassung

Neben dem Relief sind Vegetation, Landnutzung und insbesondere der Waldanteil wichtige Steuergrößen der Hochwasserentstehung. Die heutigen Forstgebiete in Mittelgebirgsräumen sind das Ergebnis einer Entwicklung, die teils bis ins Mittelalter zurückreicht, teils aber auch jüngere Ursachen haben kann (z.B. Waldschäden). Vor diesem Hintergrund beschäftigt sich der vorliegende Beitrag am Beispiel des Erzgebirges und anhand einer Niederschlag-Abfluss Modellierung mit der Frage, welche Auswirkungen historische Entwaldungsphasen auf große Hochwasser wie z.B. hundertjährige Ereignisse bis heute haben und welche Schlussfolgerungen für das Hochwasserrisikomanagement daraus abzuleiten sind. Die Ergebnisse veranschaulichen, dass Entwaldung und Waldschäden die Magnitude von Extremhochwassern stark erhöhen können. Ein hoher Waldanteil ist demzufolge in Hochwasserentstehungsgebieten notwendig, wobei Waldmehrungen größeren Umfangs in intensiv genutzten Kulturlandschaften wenig realistisch sind. Gerade deshalb ist jedoch der Schutz des Bestandswalds und die Entwicklung von Waldgebieten zu stabilen Ökosystemen obligatorisch, die weniger anfällig für Waldschäden sind.

1. Einführung

Im Kontext der Hochwasserentstehung bzw. des flächenhaften Hochwasserrückhalts sind Wälder ein kontrovers diskutiertes Thema. Unstrittig ist dabei die generelle hydrologische Wirkung von Waldflächen im Vergleich mit landwirtschaftlich genutzten Flächen, die in einer transpirationsbedingten geringeren Vorneuchte liegt sowie einer höheren Infiltration aufgrund einer höheren hydraulischen Leitfähigkeit von Waldböden. Insbesondere in Hochwasserentstehungsgebieten wie dem sächsischen Erzgebirge, das z.B. über die Mulde einen großen Teil zum Hochwasserabfluss der mittleren Elbe beiträgt, leisten die Bestandswälder einen wichtigen Beitrag zum Hochwasserrückhalt. In welchem Umfang Wälder jedoch tatsächlich Wasser zurückhalten, hängt von zahlreichen Faktoren ab, wie dem Flächenanteil in einem Gebiet, der Baumartenzusammensetzung, den bestandsspezifischen Wurzelsystemen, Vegetationsschichten, dem Waldzustand sowie Intensität und Geschichte der Bewirtschaftung. Hinzu kommen Bodeneigenschaften (Textur- und Strukturmerkmale), Hangneigung und Voregenbedingungen, so dass pauschale Aussagen zum Rückhaltevermögen von Wald kaum möglich sind.

Die mitteleuropäische Kulturlandschaft weist eine Entwicklung auf, in der die Waldnutzung aber auch großflächige Rodungen mindestens seit dem 7. Jahrhundert n. Chr. nachweisbar sind (Bork et al. 1998). Die Rodungen erstreckten sich auch auf die Mittelgebirgsräume, setzen dort jedoch erst deutlich später ein, da die ursprünglich schwer zugänglichen Gebirgslagen mit ihrem steilen Relief und den geringmächtigen, skelettreichen Böden für die ackerbauliche Nutzung weniger interessant waren. Ausgehend von der Annahme, dass die heutige Landnutzung das Ergebnis einer sich über Jahrhunderte erstreckenden historischen Entwicklung ist, stellt sich die Frage, welche Langzeiteffekte der einzelnen Entwaldungsphasen im Hinblick auf die Magnitude von Extremhochwassern ($\geq HQ_{100}$) noch nachweisbar sind und

welche Perspektiven sich daraus für den heutigen Umgang mit Waldgebieten im Kontext des flächenhaften Hochwasserrückhalts ergeben.

2. Das Untersuchungsgebiet

2.1 Überblick

Das Untersuchungsgebiete umfasst das Einzugsgebiet der Oberen Flöha im Mittleren Erzgebirge oberhalb der Stadt Olbernhau (298 km²) abzüglich des Quellgebiets der Flöha oberhalb der Talsperre Rauschenbach (78 km²), dessen Abflussganglinie stark von der Steuerung der Stauanlage geprägt ist. Das Einzugsgebiet liegt auf der Nordabdachung des Erzgebirges teils auf sächsischem, teils auf tschechischem Territorium. In Bezug auf die Böden dominieren Braunerden und Pseudogleye, die sich aus periglazialen Deckschichten über Gneisen gebildet haben, sowie Gleye in den Tallagen.

2.2 Historische Entwicklung der Waldbestände und rezente Landnutzung

Bis ins frühe 12. Jahrhundert n. Chr. kann davon ausgegangen werden, dass in weiten Teilen des Erzgebirges flächendeckend noch natürliche montane Mischwaldbestände aus Fichten, Tannen und Buchen vorhanden waren (Smejkal 2002). Erste Rodungen setzen mit dem beginnenden Bergbau im 12. Jahrhundert ein und erreichen ihr Maximum mit dem Höhepunkt des Bergbaus im 15./16. Jahrhundert. Spätestens im 18. und 19. Jahrhundert wurden zahlreiche Flächen mit Fichtenmonokulturen aufgeforstet, so dass die ursprünglichen Mischwälder bis zum 20. Jahrhundert auf wenige Flächen reduziert waren. Die dadurch dominierenden Fichtenbestände wurden wiederum seit den 1950er Jahren durch industrielle SO₂-Emissionen aus dem böhmischen Becken und den mitteldeutschen Braunkohlerevieren stark geschädigt. Als Folge war zum Ende der 1980er Jahre in einigen Forstrevieren insbesondere in Kammlagen nahezu der gesamte Fichtenbestand zerstört oder stark beschädigt (für das Untersuchungsgebiet z.B. durch Dittrich (2006) und Schwarze (2007) dokumentiert). Seit Mitte der 1980er Jahre werden zahlreiche Waldschadensgebiete mit Stech-Fichten (*Picea pungens*) und Lärchen aufgeforstet. Auf nicht aufgeforsteten Flächen hat sich durch natürliche Sukzession eine buschartige Vegetation aus Birke und Eberesche gebildet. Aus dieser Entwicklung ergeben sich die heutigen Flächenanteile von 28,5 % Nadelwald, 8,3 % Mischwald, 5,8 % Laubwald und 24,6 % Wald-Strauch Übergangsstadien (Aufforstung und natürliche Sukzession). Die verbleibenden Anteile entfallen auf Ackerflächen (21,6 %), Weideland (8,1%) und Siedlungen (3,3%).

3. Methoden

Für die Untersuchungen wird ein N-A Modell verwendet, das auf dem Modellsystem WaSiM-ETH (Schulla & Jasper 2007) basiert. Die Kalibrierung erfolgt am Pegel Pockau 1/Flöha, der rund 11 km unterhalb von Olbernhau liegt. Mit dem kalibrierten Modell wird unter der rezenten Landnutzung und unter Verwendung statistischer Starkniederschlagshöhen für das Untersuchungsgebiet (Landestalsperrenverwaltung Sachsen; T = 100a, D=12 h, DVWK-Verteilung) ein Bemessungsereignis (HQ₁₀₀) simuliert, das als Basisszenario für die weiteren Arbeitsschritte dient. Im Anschluss werden verschiedene Szenarien in das Modell implementiert, die die unterschiedlichen Phasen der Nutzungsgeschichte im Erzgebirge abbilden, da-

runter der natürliche Zustand vor dem 12. Jahrhundert und der Zustand vor dem Einsetzen der Waldschäden um 1950 (Abbildung 1).

Hinzu kommen zwei Zukunftsszenarien mit aufgeforsteten Waldschadensgebieten sowie den Vorbehaltsflächen Waldmehrung aus dem Regionalplan Chemnitz-Erzgebirge (RPV Chemnitz-Erzgebirge, 2008)

Die Parametrisierung der Szenarien erfolgt in Anlehnung an die Untersuchungen von Rieger et al. (2010) und Wahren et al. (2009). Neben der eigentlichen Bodenbedeckung werden im Modell auch die hydraulische Leitfähigkeit der Böden und Makroporentiefe und -kapazität in Abhängigkeit des jeweiligen Nutzungstyps (Acker, Wald; Weideland) angepasst. Um auch die veränderten Vorfeuchtebedingungen bei unterschiedlicher Landnutzung zu berücksichtigen, wird dem Bemessungsereignis in jedem Szenario eine 6-monatige Anlaufphase vorangestellt, für die die meteorologischen Daten von Januar bis Juni 2005 verwendet werden. Insbesondere im Juni 2005 lagen Temperaturen und Niederschläge sehr nahe an den Monatsmittelwerten der Periode 1981-2010, so dass von durchschnittlichen Sommerwerten als Vorbedingung für das Bemessungsereignis ausgegangen werden kann.

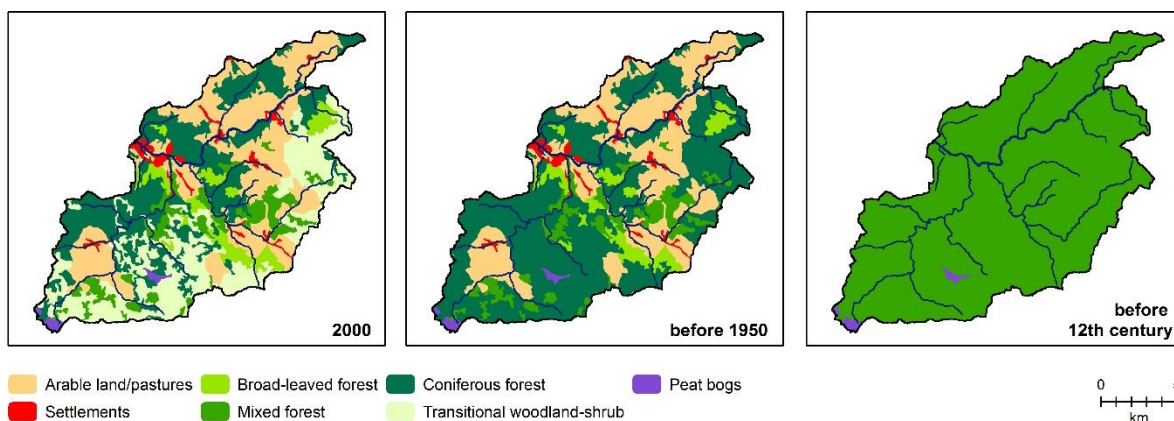


Abb. 1: Landnutzungsszenarien für die hydrologische Modellierung. Links der heutige Zustand (CORINE Landcover 2000), in der Mitte die Verteilung nach Aufforstung mit Fichten im 19. Jahrhundert und vor Beginn emissionsbedingter Waldschäden seit 1950 sowie rechts der angenommenen Zustand vor dem 12. Jahrhundert mit intakten Mischwaldbeständen.

4. Ergebnisse

Die simulierte HQ₁₀₀ Ganglinie zeigt im Basisszenario (gegenwärtiger Zustand) für den Standort Olbernhau (Abbildung 2) den für Mittelgebirge typischen steilen Anstieg der Abflüsse, eine schmale Scheitelphase und einen flacheren abfallenden Ast. Der Scheitelabfluss liegt bei $184 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, was einer Abflussspende von $807 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ entspricht.

Nach Implementierung der Landnutzungsszenarien zeigen sich im Vergleich mit dem Ist-Zustand deutlich geringere Hochwasserabflüsse (Abbildung 2). Unter der Annahme einer Komplettbewaldung mit Mischwäldern, wie sie vor dem 12. Jahrhundert bestanden hat, liegt der Hochwasserscheitel nur noch bei $145 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (-21%) und die Abflussspende reduziert sich auf $636 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$. Die Abflussfülle in den ersten 48 Stunden des Ereignisses verringert sich dabei gegenüber dem Ist-Zustand um 2,4 Mill. auf nur 10,1 Mill. m^3 . Ähnlich fällt die Scheitelminderung im Vergleich des aktuellen Waldanteils mit dem Zustand vor 1950 aus.

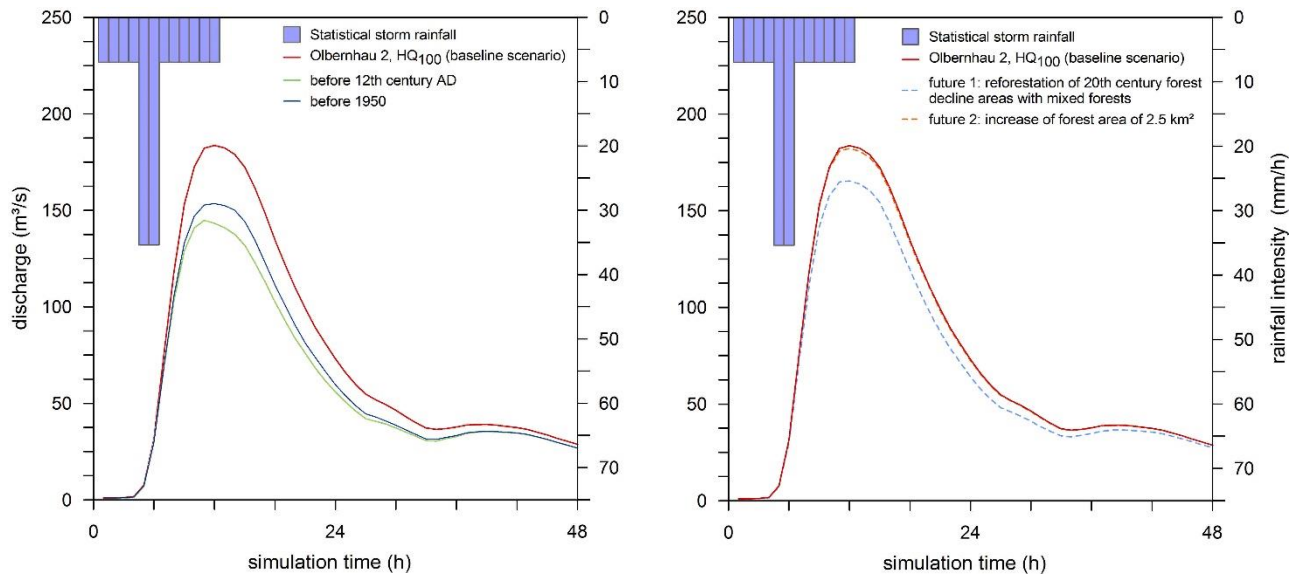


Abb. 2: HQ₁₀₀ Ganglinien in den Modellszenarien. Links: Waldanteil vor dem 12. Jahrhundert (Komplettbewaldung, Mischwald) sowie vor Beginn der Waldschäden 1950. Rechts: Zukunftsszenarien mit Aufforstung der Waldschadensgebiete mit standorttypischen Mischwäldern sowie bei Aufforstung der im Regionalplan ausgewiesenen Vorbehaltsgebiete Waldmehrung.

Der Scheitelabfluss erreicht $154 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (-16,4%) bei einer Abflussfülle von 10,6 Mill. m^3 und einer Abflussspende von $675 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$. Auffällig ist dabei, dass die Ganglinien der beiden historischen Szenarios trotz sehr unterschiedlichen Waldanteils nahe bei einander liegen. Die Ursache dafür ist in der Veränderung der Bestandstypen zu sehen, d.h. der im Vergleich zum 12. Jahrhundert geringere Waldanteil um 1950 wird im Modell durch die etwas höhere Retentionswirkung der Nadelwaldbestände (z.B. geringere Vorfeuchte als bei Mischwald) kompensiert. Werden die aktuellen Waldschadensgebiete im Sinne der sächsischen Waldentwicklungsstrategien als mit Mischwaldbeständen aufgeforstet angenommen, ergibt sich ebenfalls ein deutlich niedrigerer Hochwasserscheitel als unter rezenten Bedingungen (Abbildung 2, rechte Seite). Im Waldmehrungsszenario nach Regionalplan ergibt sich wiederum aufgrund des geringen Flächenanteils von $2,5 \text{ km}^2$ nur eine minimale Reduzierung des Hochwasserscheitels.

5. Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse beziehen sich zwar auf ein charakteristisches sommerliches Ereignis und sind mit den typischen Unsicherheiten von N-A Modellen behaftet (für eine ausführliche Diskussion der Ergebnisse siehe Reinhardt-Imjela et al., 2018), zeigen jedoch eine klare Tendenz. Der heutige Waldanteil im Erzgebirge mit seiner charakteristischen Baumartenzusammensetzung ist letztlich das Ergebnis einer mehr als achthundertjährigen Entwicklung, die bis heute nachwirkt. Großflächige Entwaldungen können bei großen Hochwassern deutliche Auswirkungen auf die Hochwasserentstehung haben. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass ein primäres Ziel, im Sinne des Hochwasserrisikomanagements, der Schutz von Waldbeständen sein muss, um Entwaldung und Waldschäden zu vermeiden. Schadstoffemissionen im Erzgebirge oder in der Vergangenheit massiver Kahlschlag durch Holznutzung sind dabei nur zwei mögliche Ursachen. In anderen Forstgebieten kommen z.B. Sturmkalamitäten in

Monokulturen wie etwa durch den Orkan Kyrill 2007 oder auch Borkenkäferbefall hinzu. Da Waldmehrung aus Hochwassersicht nur signifikante Wirkungen zeigt, wenn große Flächen zur Verfügung stehen, kommt in intensiv genutzten Kulturlandschaften dem Bestandstyp eine besondere Bedeutung zu. Standortangepasste Mischwälder sind trotz etwas geringerer Rückhaltewirkung deutlich weniger anfällig gegenüber Windwurf oder Schädlingsbefall als Nadelreinbestände. Für die Hochwasserentstehungsgebiete im Erzgebirge ist darüber hinaus damit zu rechnen, dass die konsequente Entwicklung und Wiederbewaldung der Waldschadensgebiete in den Kammlagen zu einer deutlichen Verbesserung des Hochwasserrückhalts führen kann.

Literatur

- Bork, H.-R., Bork, H., Dalchow, C., Faust, B., Piorr, H.-P., Schatz, Th., 1998. Landschaftsentwicklung in Mitteleuropa. Klett-Perhes, Gotha and Stuttgart.
- Dittrich, K., 2006. Neue Chancen für den Wald im Mittleren Erzgebirge – Bewältigung der Folgen extremer Immissionsschäden bei Deutscheinsiedel. *Forst & Holz* 61: 89-94.
- RPV Chemnitz-Erzgebirge, 2008. Regionalplan Chemnitz-Erzgebirge. Fortschreibung, S. 67.
- Reinhardt-Imjela, Ch., Imjela, R., Bölscher, J., Schulte, A., 2018. The impact of late medieval deforestation and 20th century forest decline on extreme flood magnitudes in the Ore Mountains (Southeastern Germany). *Quaternary International* 475: 42-53. DOI: 10.1016/j.quaint.2017.12.010
- Rieger, W., Winter, F., Disse, M., 2010. Uncertainties of soil parameterisation in process-based simulation of distributed flood control measures. *Advances in Geosciences* 27, 121-129.
- Schulla, J., Jasper, K., 2007. Model description WaSiM-ETH. 181 p. Verfügbar unter: www.wasim.ch.
- Schwarze, R., 2007. Runoff formation and water balance of forested catchments. In: Puhmann, H., Schwarze, R., Federov, S. F., Marunich, S. V. (Eds.), *Forest hydrology – results of research in Germany and Russia*. IHP/HWRP report 6, 3-23.
- Smejkal, J., 2002. Historical development of the Ore Mts. Forests. in: Lomský, B., Materna, J., Pfanž, H. (Eds.), *SO₂-pollution and Forest Decline in the Ore Mountains*. Forestry and Game Management Research Institute, Jíloviště-Strnady, pp. 16-19.
- Wahren, A., Feger, K.-H., Schwärzel, K., Münch, A., 2009. Land-use effects on flood generation – considering soil hydraulic measurements in modelling. *Advances in Geosciences* 21, 99-107.

Bewertung des Einflusses des hydrologischen Verhaltens verschiedener Karsttributäre aus dem tiefen und seichten Karst auf die Wasserqualität der Altmühl

Eva Olmo Gil, Martin Trappe, Benno Kuegel, Ulrich Kaul

Zusammenfassung

Karstgebiete sind wichtige Teilräume im hydrologischen Kreislauf und ihnen fällt eine große Bedeutung bei der Wasserversorgung der Bevölkerung zu. Die Altmühl ist ein nördlicher Nebenfluss der Donau, der mit einer mittleren Wasserführung von gut 24 m³/s in die Donau mündet. Im Karstgebiet der Südlichen Frankenalb weist die Altmühl ein geringes Gefälle auf, die durch die Landschafts- und Flussentwicklung im Tertiär und Quartär verursacht wurde. Wasserqualitätskarten der Bayerischen Wasserwirtschaft bezeichnen die Altmühl als mäßig bis kritisch belastet für organische Stoffe und als Polytroph für Nährstoffbelastung. Vor allem in den Frühjahrs- und Sommermonaten wird durch die intensive Sonneneinstrahlung ein dramatischer Anstieg der Wassertemperatur, die oft den Prozess der Eutrophierung verursacht. Der Einfluss der Karstquellen und Nebengewässern auf die Wasserqualität der Altmühl ist abhängig von ihren Einzugsgebieten und ihrem unterschiedlichen Niederschlags-Abflussverhalten. Ziel der hydrologischen Studie ist es, den Einfluss des hydrologischen Verhaltens verschiedener Karsttributäre und des Karsteintrags bezüglich der Nitrat-Stickstoff- und Orthophosphat-Phosphorbelastung auf die Wasserqualität der Altmühl unter verschiedenen klimatischen und hydrologischen Bedingungen zu bewerten und zu zeigen, wie sich das Verhalten der Altmühl in zwei Szenarien mit Hochwasser einerseits und unter Basisabflussbedingungen andererseits darstellt. Dabei ging es vor allem darum, ob der Karst der Südlichen Frankenalb eine Fähigkeit zur Verbesserung der Wasserqualität der Altmühl aufweist, und wenn ja, zu welchem Zeitpunkt der Einfluss des tiefen und des seichten Karstes am wirksamsten ist und zu welchem Zeitpunkt die landwirtschaftliche Nutzung mehr Einfluss auf die Wasserqualität des Flusses haben. Die Auswirkungen der Karstquellen auf den Vorfluter werden beschrieben basierend auf Konzentrations- und Frachtänderungen von Nitrat-Stickstoff- und Orthophosphat-Phosphor sowie der physikalischen Parameter Temperatur, elektrische Leitfähigkeit und pH entlang des Vorfluters über einen längeren Zeitraum, einer zeitgleichen Datenreihe von hydrologischen, physikalischen und chemischen Parametern für verschiedene Karstquellen und anderer Karsttributäre und einer Modellierung der für die Gewässergüte relevanten biologischen und physikochemischen Parameter der Altmühl mit Hilfe des DWA-Gewässergütemodel.

1. Einführung

Karstgebiete sind wichtige Teilräume des Wasserkreislaufs und von großer Bedeutung für die Wasserversorgung der Bevölkerung. Schätzungsweise 25 % der Weltbevölkerung beziehen ihr Trinkwasser aus Karst-Aquiferen (Goldscheider (2012)). Laut Ford & Williams (2007) bedecken Karbonatgesteine und Karstgebiete weltweit etwa 22 Millionen km² und machen etwa 12 % der globalen Landfläche aus. Viele Autoren sind sich einig, dass das Hauptproblem bei Karstwassern ihre Vulnerabilität ist, da Karstgesteine eine geringe Filterwirkung aufweisen (Trappe (2016)). Die hydrologischen Bedingungen von Karstgebieten und deren Wasserqualität werden seit geraumer Zeit durch wissenschaftliche Fragestellungen untersucht. Die Verunreinigung des Karstwassers hängt von zahlreichen Einflussfaktoren ab. Insbesondere die durch die Landwirtschaft oder das Abwasser eingeleiteten Schadstoffe führen zur Verschmutzung von Oberflächen- und Grundwasser in Karstgebieten (Guo et al. (2007), Baker & Groves (2009), Zielhofer (2009), Mellander et al. (2012), Boy-Roura et al. (2013)). Zu den verschiedenen hydrologischen Prozessen in verschiedenen raumzeitlichen Dimensionen verschiedener Karstregionen gibt es bereits zahlreiche Forschungsarbeiten (Musgrove et al. (2010), Rugel et al. (2016)). Dennoch ist die Bedeutung von Karstwasser (aus Karstquellen und anderen Karstzuflüssen) für die jeweiligen Vorfluter nur unzureichend beschrieben (Olmo Gil (2017), Rugel et al. (2016)). Aus diesem Grund ist es das Ziel der vorliegen-

den Arbeit, die Einzugsgebietsparameter von Karstquellen und ihre hydrologischen und chemischen Eigenschaften mit der hydrologischen und chemischen Variation eines Oberflächenflusses mit bestimmten klimatischen und hydrologischen Szenarien zu verknüpfen. Zu diesem Zweck wurde die Karstregion "Südliche Frankenalb" in Bayern untersucht.

2. Messprogramm und Untersuchungsmethodik

Die Auswirkungen der Karstquellen auf die Vorfluter werden anhand einer Änderung der Konzentration von Bestandteilen und physikalischen Parametern entlang des Vorfluters über einen längeren Zeitraum, einer gleichzeitigen Datenreihe für verschiedene Karstquellen und andere Karstbeteiligte und einer Modellierung der für die Wasserqualität relevanten physikalisch-chemischen Parameter des Vorfluters mit Hilfe des DWA-Wasserqualitätsmodells (ATV-DVWK (2002)) beschrieben, so dass das methodische Untersuchungskonzept aus folgenden Komponenten bestand:

- Kontinuierliche Datenerfassung (Abfluss, Niederschlagsdaten, Quellschüttungen, Aufnahme physikalischer, chemischer und biologischer Parameter) während des Bearbeitungszeitraums (2007-2009).
- Vergleich und Bewertung der Parameter im Hinblick auf die Anteile der verschiedenen hydrologischen Herkunftskomponenten Karsttributäre.
- Erstellung einer hydrologischen Modellbilanz mit dem DWA-Wasserqualitätsmodell (ATV-DVWK (2002))

3. Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet befindet sich in der südlichen Frankenalb (Deutschland). Es umfasst eine Fläche von 416,29 km² und wird von einem Abschnitt der Altmühl mit einer Flusslänge von 46,2 km zwischen den Städten Treuchtlingen und Eichstätt durchzogen (siehe Abbildung 1). Die Klimastation Häringhof (N 48°53'34", E 11°13'01", Höhe: 517 m ü. M.) erfasst in diesem Bereich eine langfristige durchschnittliche Lufttemperatur von 8,7 °C sowie eine durchschnittliche jährliche Niederschlagssumme von 730,8 mm pro Jahr. Die Daten der verschiedenen Parameter wurden an 14 Stellen entlang der Altmühl, 3 Karstzuflüsse, 8 Karstquellen (seichter Karst, tiefer Karst) und 12 Kläranlagen (WTTP) erhoben.

4. Ergebnisse und Diskussion

Die Altmühl im Bereich der südlichen Frankenalb zwischen Treuchtlingen und Eichstätt wird aus verschiedenen Quellen hydrologisch versorgt. Ein Teil des Wassers kommt aus dem Oberlauf der Altmühl nordwestlich von Treuchtlingen (allochthones Wasser des mittelfränkischen Vorlandes). Karstquellen und Karstzuflüsse im Bereich zwischen Treuchtlingen und Eichstätt liefern Wasser aus dem umliegenden Karstgebiet und darüber hinaus kann diffus zugeführtes Wasser aus dem Karst nachgewiesen werden. Diese einzelnen Komponenten zeigen unterschiedliche Anteile in Bezug auf unterschiedliche Jahreszeiten oder individuelle Wetterszenarien.

Der hohe Anteil an allochthonem Wasser stromaufwärts im Winter/Frühling wird durch einen erhöhten Anteil an Karstwasser im Sommer und Herbst reduziert, wenn der Gesamtabfluss der Altmühl abnimmt (siehe Abb. 2).

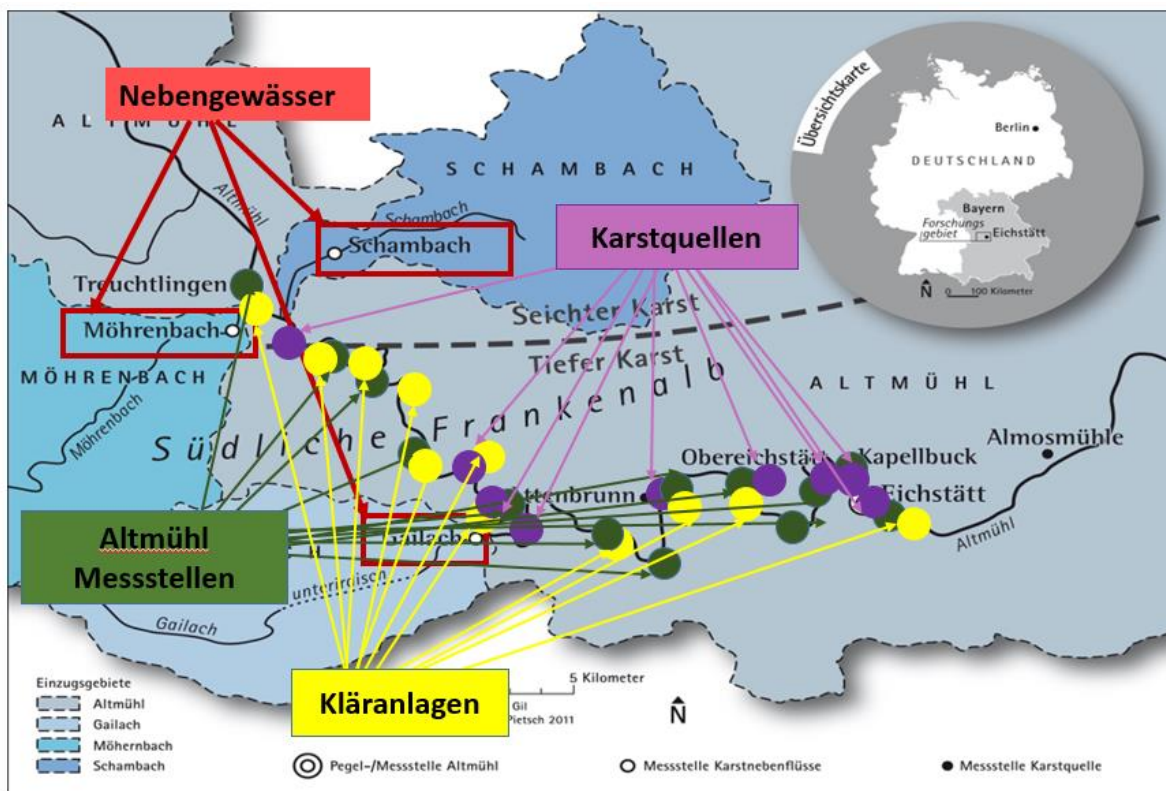


Abb. 1: Untersuchungsgebiet (416,29 km², Flusslänge: 46.2 Km). Quelle: Olmo Gil (2017)

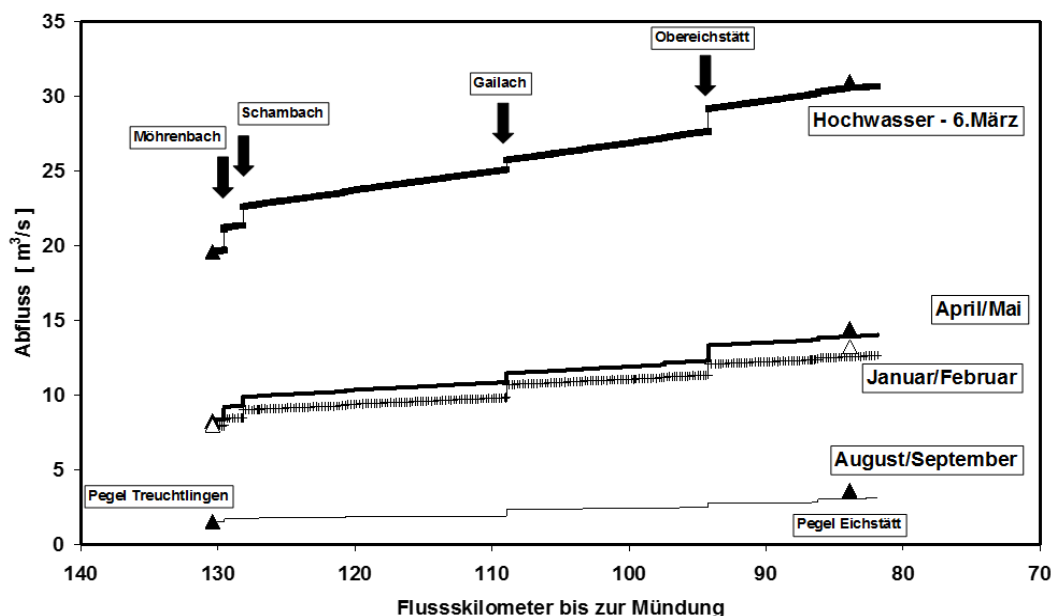


Abb. 2: Abflussmodellierung der Altmühl für verschiedene Abfluss-Szenarien im Jahre 2008 mit Hilfe des DWA-Gewässergütemodells unter Verwendung der Schüttungen einzelner Karstquellen und kleinerer Nebengewässer. Quelle: Olmo Gil et al. (2010)

Betrachtet man die Herkunft der Nährstoffe, so zeigt sich die große Bedeutung der Karstzuflüsse für die Nährstoffkonzentration des Flusses, insbesondere bei Niedrigwasserabflüssen an der Altmühl.

Abbildung 3 zeigt die Modellierung der Chlorophyll-a vs $\text{NO}_3\text{-N}$ and $\text{PO}_4\text{-P}$ in der Base-Flow Situation und in der Hochwassersituation. In der Basisströmungssituation besteht ein Zusammenhang zwischen den Konzentrationen von Chlorophyll-a und der Konzentration von Nährstoffen (Nitrat, Orthophosphat), die von den Karstzuflüssen und den Kläranlagen eingebracht werden. Bei hohen Wasserständen bleiben die Konzentrationen von Chlorophyll-a und Nährstoffen entlang des Flusses aufgrund des hohen Eingangs aus dem stromaufwärts gelegenen Vorland konstant. Der Einfluss der Karstquellen wird reduziert.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Konzentration von Chlorophyll-a in der Basisabflusssituation von den Nährstoffeinträgen aus den Karstzuflüssen und Kläranlagen in die Altmühl abhängt. Der $\text{PO}_4\text{-P}$, der aus den Kläranlagen in die Altmühl eingeleitet wurde, spielte eine wichtigere Rolle als der $\text{NO}_3\text{-N}$, der aus den Karstzuflüssen abgeleitet wurde. Damit wird das Phosphat aus den Kläranlagen zur Hauptverantwortlichen für die Eutrophierung der Altmühl. Dies lässt sich dadurch erklären, dass kleine Kläranlagen (< 10 000 Einwohner) nicht über die tertiäre Behandlung zur Phosphorelimination verfügen.

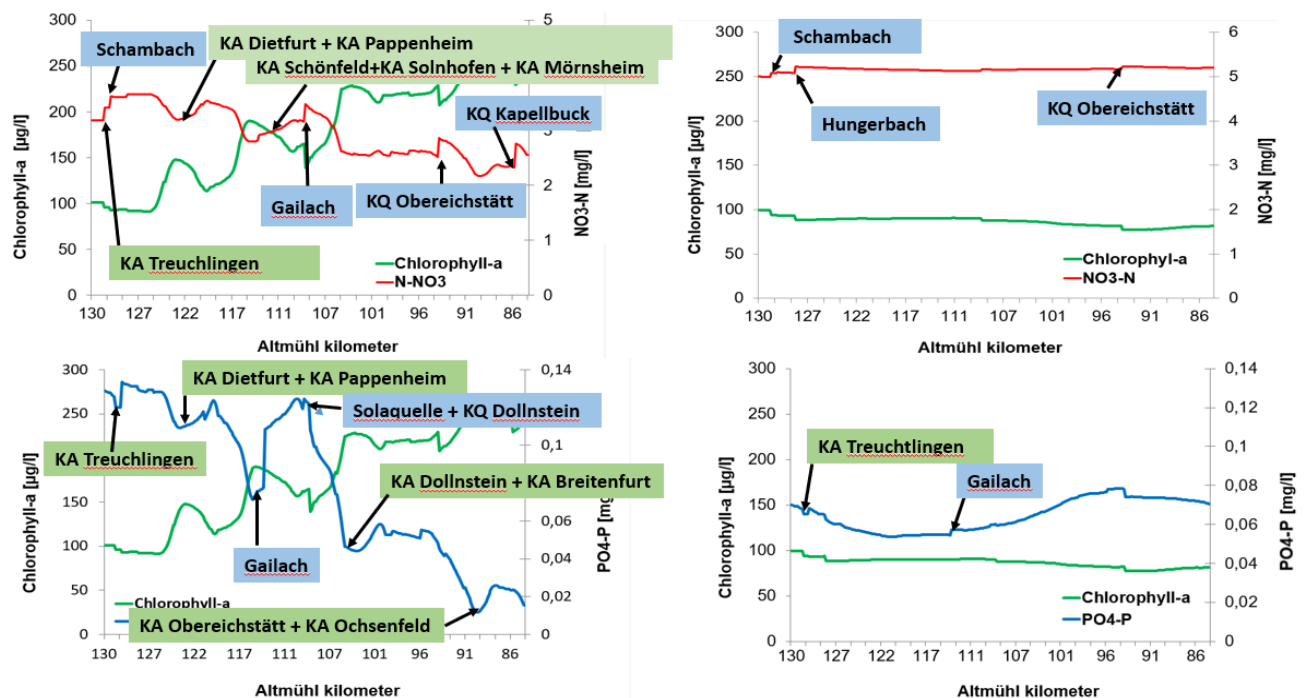


Abb. 3: Modellierung der Konzentration von Chlorophyll-a vs $\text{NO}_3\text{-N}$ and $\text{PO}_4\text{-P}$ in der Basisabflusssituation 2008 (links) und in der Hochwassersituation 2008 (rechts)

Literatur

- ATV-DVWK, 2002. Arbeitsgruppe GB-4.2 Handbuch ATV-DVWK Gewässergütemodell. Herausgeber. ATV-DVWK Hauptgeschäftsstelle Hennef.
- Baker, T. W., Groves, G. C., 2009. Waterquality Impacts from Agricultural Land Use in Karst Drainage Basins of SW Kentucky and SW China. – In: Webb, R.M.T. % Semmens, D.J. (eds.): Planning for an uncertain future – Monitoring, integration and adaptation. – Pro-

- ceedings of the Third Interagency Conference on Research in the Watersheds: USGS Scientific Investigations Report, 2009 – 5049: 103-116.
- Boy-Roura, M., Menció, A., Mas-Pla, J., 2013. Temporal analysis of spring water data to assess nitrate inputs to groundwater in an agricultural area (Osona, NE Spain). – *Science of the Total Environment* 452-453, 433-445.
- Ford, D., Williams, P., 2007. *Karst geomorphology and hydrology*. Verlag John Wiley & Sons. London, Boston, Sydney, Wellington. 562 S. for conservation, 198, Wellington, New Zealand Department of Conservation, 60p.
- Goldscheider, N., 2012. A holistic approach to groundwater protection and ecosystem services in karst terrains *AQUA mundi* 3: 2. 117-124.
- Guo, F. Jiang, G., Yuan, D.X., 2007. Major ions in typical subterranean rivers and their anthropogenic impacts in southwest karst areas, China. – *Environmental Geology* 65, 664-672.
- Mellander, P.E., Jordan, P., Wall, D. P., Melland, A. R., Meehan, R.; Kelly, C., Shortle, G., 2012. Delivery and impact bypass in a karst aquifer with high phosphorus source and pathways potential. - *Water Research* 46, 2225-2236.
- Musgrove, M., Stern, L. A., Banner, J. L., 2010. Springwater geochemistry at Honey Creek State Natural Area, central Texas: Implications for surface water and groundwater interaction in a karst aquifer. - *Journal of Hydrology* 388, p. 144-156.
- Olmo Gil, E., Kaul, U., Trappe, M., Becht, M., 2010. Untersuchung der Niederschlag-Abfluss-Beziehungen von Karstquellen und Nebengewässern der Altmühl / Südliche Frankenalb (Bayern). In *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung Heft 28.10*. S. 229-236. Beiträge zum 2. Trierer Workshop zur Niederschlag-Abfluss-Modellierung am 14./15. September 2009 in Trier. Universität Trier - Forschungszentrum für Regional- und Umweltstatistik und DWA.
- Olmo Gil, E., 2017. *Der Einfluss von Karstquellen und Nebengewässern auf die Wasserqualität der Altmühl im Bereich zwischen Treuchtlingen und Eichstätt/Südliche Frankenalb*, SHAKER Verlag, 208 S. ISBN: 978-3-8440-5289-3.
- Rugel, K., Golladay, S. W., Jackson, C. R., Rassmussen, T. C., 2016. Delineating groundwater/surface water interaction in a karstwatershed: Lower Flint River Basin, southwestern Georgia, USA. - *Journal of Hydrology: Regional Studies* 5, p. 1-19.
- Trappe, M., 2016. Modern resource use and its impact to karst.- *Zeitschrift für Geomorphologie*, Vol 60, Suppl., p. 153-174. (Olmo Gil, 2017).
- Zielhofer, C., 2009. The protection potential of soils and post-Jurassic covers against nitrate seepage (Southern Franconian Jura, Germany). – *Zeitschrift für Geomorphologie N.F.* 53, 3:371-386.

Nutzung von Klimadaten aus Zirkulationsmodellen: Tools für die Entscheidungsunterstützung der Talsperrenbewirtschaftung im Wuppereinzugsgebiet

Marc Scheibel, Paula Lorza, Eleni Teneketzi

Zusammenfassung

Im Zusammenhang mit einer saisonalen Verschiebung des Niederschlagsregimes hat das Vorkommen von Trockenperioden und Starkregenereignissen in den letzten Jahrzehnten im Wuppereinzugsgebiet zugenommen. Im Rahmen des Horizon2020 Projektes "BINGO" werden die Auswirkungen von Klimawandel- und Nutzungsszenarien auf den Wasserkreislauf und -dargebot im Einzugsgebiet untersucht. Der wasserwirtschaftliche Ansatz in BINGO konzentriert sich auf die Identifizierung und Vergleich von vergangenen und zukünftigen Wetterextremen und Anomalien durch den Klimawandel. Historische Trockenperioden werden auf der Grundlage meteorologischer Daten, herunterskalierter CORDEX-Daten (Zeitraum: 1951 – 2005) und Reanalyseprodukten (Zeitraum: 1979 – 2015) mit Hilfe von Indizes wie SPI und SPEI beurteilt. Mit mittelfristigen Ensemble-Klimaprognosen (MiKlip, Zeitraum 2015-2024) und langfristigen Klimaprojektionen (RCPs-Szenarien, Zeitraum 2006-2100) werden analog dieselben Indizes für die Zukunft ermittelt und Kenngrößen wie Speicherinhalt oder Niedrigwasserabfluss für zukünftige Bedingungen mittels Impact-Model für unterschiedliche Szenarien (prognostizierte Land- und Wassernutzung) berechnet und den Indizes gegenübergestellt. Zukünftige Wahrscheinlichkeiten und Ausprägungen von Trockenperioden und deren potenzielle Auswirkungen auf die Speicherbewirtschaftung sollen so identifiziert werden. Die Ermittlung verschiedener Indizes hat sich vor dem Hintergrund der Unsicherheiten der Prognosen und systematischer Fehler in den Modellen als robuste Methode zum Vergleich verschiedener Datensätze erwiesen. Dieser Ansatz dient daher als ein Werkzeug, das Entscheidungsprozesse für die Talsperrenbewirtschaftung unterstützt. Für diese spielt auch die Wasserqualität eine besondere Rolle im Wasserressourcenmanagement. Das JPI-Climate Projekt "WATExR" hat daher als Ziel die Integration von Ökosystemmodellierung und saisonalen Klimavorhersagen in das Wasserressourcenmanagement. Die komplexen Wirkzusammenhänge können nur durch eine Verknüpfung von Wassermengen- mit Wasserqualitätsmodellen abgebildet werden. Da die Prozesse eine kürzere Reaktionszeit besitzen, ist hier vor Allem die Einbindung saisonaler Vorhersagen relevant. Um mit den großen Mengen an der für die oben genannten Anforderungen benötigten Daten - auch für eine operative Prognose - umzugehen, ist es notwendig die Bearbeitung und Speicherung der diversen Klimadaten-Produkte zu optimieren und zu automatisieren. Sämtliche verfügbaren Datenquellen (Insitu-Messungen der Mengen und Güteparameter, meteorologischen Daten, Fernerkundungsdaten etc.) müssen in einer Umgebung eingesammelt, verarbeitet und visualisiert werden. Der Wupperverband benutzt hierzu die FEWS-Plattform von Deltares, in der sich mittels unterschiedlichster Skriptsprachen wie Java, Python und R die Prozesse und Modelle steuern lassen. So lässt sich auch die enge Verzahnung der Mengen- und Gütemodelle ermöglichen und Darstellungen probabilistischer Ergebnisse verwirklichen.

1. Einleitung

Für das Wuppereinzugsgebiet haben sich in den letzten Jahren signifikante Verschiebungen im Niederschlagsgeschehen ergeben. Abbildung 1 zeigt am Beispiel des Wasserwirtschaftsjahres 2018 wie sich diese Veränderungen darstellen. Im Vergleich mit den 110jährigen Monatsmittelwerten war der Winter relativ feucht (was glücklicherweise die Talsperren nach bereits längeren Trockenheitsperioden in den Jahren davor wieder gefüllt hat), jedoch war die Periode Juli bis Oktober die trockenste, welche je in den 110 Jahren gemessen wurde. Rechts in Abbildung 1 sehen wir aber auch die Darstellung eines (von 3 extremen!!!) Starkregenereignissen im Jahr 2018, welche im Wupperverbandsgebiet niedergegangen sind. Solche konvektiven Ereignisse sind im Wuppereinzugsgebiet meistens mit Maximum innerhalb einer Stunde. Somit ist bei dem Ereignis (und an den folgenden) auch an vielen Stellen, mehr als der durchschnittliche Monatsniederschlag innerhalb einer Stunde gefallen.

Somit war das Jahr – trotz der 4-monatigen extremen Trockenperiode – „nur“ an Platz 28 der trockensten Jahre (in 110 Jahren Aufzeichnung). Die wasserwirtschaftlich entscheidende Änderung ist also nicht die Jahressumme, sondern die Verteilung innerhalb des Wasserwirtschaftsjahres, was durch die Beobachtungen der letzten Jahre bestätigt wird.

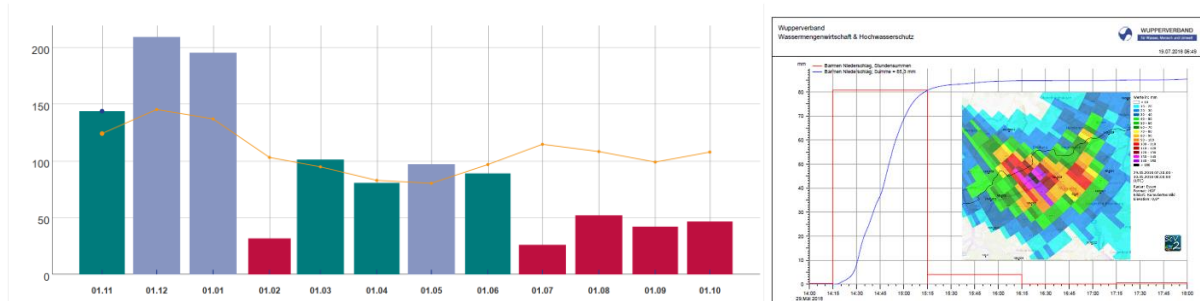


Abb. 1: Veränderungen im Niederschlagsgeschehen mit ausgeprägten Trockenperioden in 2018 (links) und Starkregen Mai 2018 (rechts).

Hinzu kommt, dass in den geschützten und daher naturnahen Einzugsgebieten der Trinkwassertalsperren, ein großer Interzeptionsspeicher vorhanden ist und konvektive Sommerstarkregenereignisse keinen bzw. geringen Oberflächenabfluss bringen. Hier ist somit die Jahreszeit in dem das Niederschlagsdargebot vorliegt entscheidend.

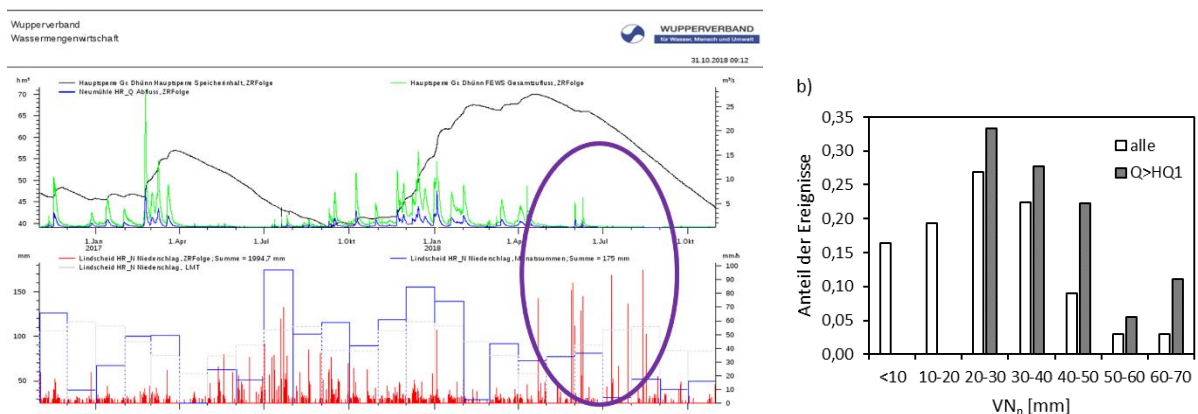


Abb. 2: Geringer Oberflächenabfluss bei Sommerereignissen im Zulauf zu einer Trinkwassertalsperre (links) und benötigte Vorfeuchte (abgebildet über Vorregenindex) für größere Abflüsse in eine Pegelinzugsgebiet (rechts).

So ergeben sich 2 gegenteilige Problemfelder im Wuppereinzugsgebiet: Starkregenereignisse mit teilweise sturzflutartigem Oberflächenabfluss und Ausuferungen der Gewässer - vor Allem im urbanen Raum - und fehlende Durchflussmengen in den Gewässern und den Zulaufen der Talsperren. Damit bekommt die Auseinandersetzung mit zukünftigen Entwicklungen eine hohe Bedeutung für die Entwicklung von rechtzeitigen Anpassungsmaßnahmen.

2. Methodik zur Ableitung von Anpassungsmaßnahmen für zukünftige Entwicklungen im Wasserdargebot

Zur Einordnung der bekannten Situationen in Vergangenheit und Zukunft werden historische Trockenperioden und deren Auswirkungen auf das Wasserdargebot mittels meteorologischer

Messdaten, sowie herunterskalierten, historischen CORDEX-Daten (Zeitraum: 1951 – 2005) und Reanalyseprodukten (Zeitraum: 1979 – 2015) bewertet. Unter Verwendung der Daten in Impact-Modelle zur Modellierung des Wasserhaushaltes und Ableitung statistischer Indices wie den SPI („Standardized Precipitation Index“) oder den SPEI („Standardized Precipitation Evapotranspiration Index“) – siehe z.B. WMO (2016) – wird der Zusammenhang zwischen kritischen wasserwirtschaftlichen Situationen und der Einordnung in klassifizierten meteorologischen Situationen beurteilt. Dazu wird der aktuelle Systemzustand (Talsperre vorhanden, gültige Betriebsregeln, aktuelle Landnutzung, aktueller Wasserverbrauch) über 80 Jahre simuliert und kritischen Situationen (hier Unterschreitung eines bestimmten Mindestspeicherinhaltes) rein aufgrund der hydrometeorologischen Randbedingungen identifiziert (siehe Abbildung 3).

Diese Situationen kann man nun den entsprechenden Indizes gegenüberstellen und als Predictor einordnen.

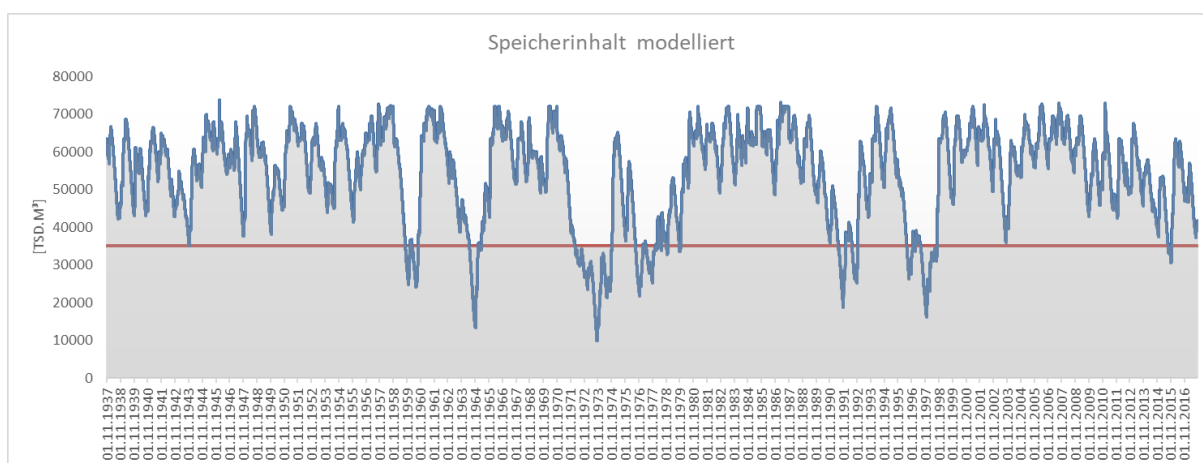


Abb. 3: Simulierter Speicherinhalt über 80 Jahre (1937-2017) für den aktuellen Systemzustand zur Ermittlung der hydrometeorologischen Wirkungen in der Vergangenheit

Die Indizes wurden auch für saisonale (ECMWF), mittelfristige Klimaprognosen (MiKlip, Test-Zeitraum: 2015-2024) und langfristige Klimaprojektionen (RCPs-Szenario 8.5, Zeitraum 2006-2100) ermittelt. Somit können zukünftige anomale Trockenperioden identifiziert werden und Ergebnisse von MiKlip- und RCPs-Szenarien für das nächste Jahrzehnt verglichen werden. Aktuell vorbereitet wird der Vergleich auch mit regionalen Klimaprojektionen aus dem Projekt ReKliEs-De (Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland). Für die Identifizierung von ausgeprägten Trockenperioden in der Zukunft kann die zeitliche (Tageswerte) und räumliche Auflösung (12 km) der Daten als ausreichend betrachtet werden. Der durchgeführte Vergleich für ein einzelnes Szenario zeigt jedoch, dass ohne weitere Herunterskalierung der Daten (z.B. auf 2,2 km) eine Abbildung von konvektiven Starkregenereignissen nicht abbildbar.

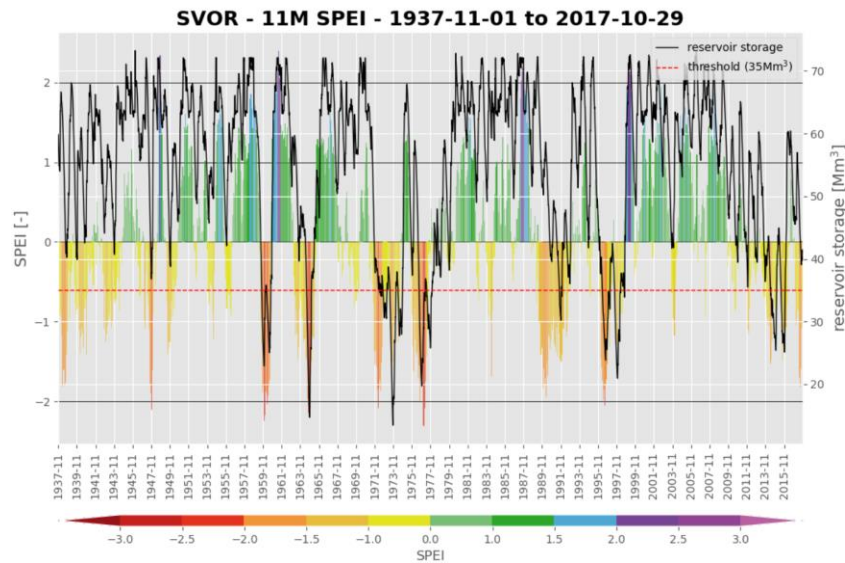


Abb. 4: Zuordnung des 11-Monats SPEI zu den Speicherinhalten, Oestermann (2019)

ist. Abbildung 5 links zeigt das Einzugsgebiet der Dhünn und das 12 km Raster den meteorologischen Eingangsdaten. Im rechten Teil sind die Simulationen des Speicherinhaltes und den tatsächlichen Beobachtungswerten im Überlappungsbereich der vorliegenden Dekade und den bereits vorliegenden Beobachtungen (2015-2018). Dargestellt sind 3 von 10 Realisationen (Min, Max und Mit).

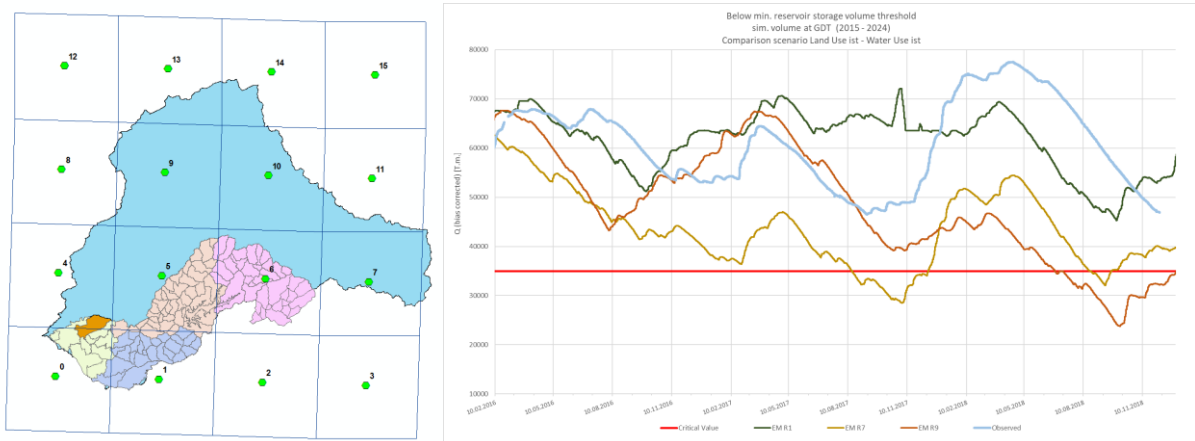


Abb. 5: Gesamt-Einzugsgebiet der Dhünn und zugehörige Rasterfelder – MiKlip (12km) links und simulierter Speicherinhalt für die Realisationen 1, 7 und 9 mit Beobachtungen

3. Auswirkungen der Klimaänderungen auf die Wasserqualität

Neben der Wassermenge spielt die Wasserqualität eine besondere Rolle im Wasserressourcenmanagement. Das JPI-Climate Projekt WATeXr hat daher als Ziel die Integration von Ökosystemmodellierung und saisonalen Klimavorhersagen für eine effiziente Anpassung des Wasserressourcenmanagements unter Berücksichtigung klimatischer Extremereignisse. In der deutschen Fallstudie legt die Betrachtung der Wuppertalsperre im Mittelpunkt. Die komplexen Wirkzusammenhänge können nur durch eine Verknüpfung von Wassermengen- mit Wasserqualitätsmodellen abgebildet werden. Da die Prozesse eine kürzere Reaktionszeit

besitzen, ist hier vor Allem die Einbindung saisonaler Vorhersagen relevant. Um mit den großen Mengen an der für die oben genannten Anforderungen benötigten Daten - auch für eine operative Prognose - umzugehen, ist es notwendig die Bearbeitung und Speicherung der diversen Klimadaten-Produkte zu optimieren und zu automatisieren. Sämtliche verfügbaren Datenquellen (Insitu-Messungen der Mengen und Güteparameter, meteorologischen Daten, Fernerkundungsdaten etc.) müssen in einer Umgebung eingesammelt, verarbeitet und visualisiert werden. Der Wupperverband benutzt hierzu die FEWS-Plattform von Deltares, in der sich mittels unterschiedlichster Skriptsprachen wie Python und R die Prozesse und Modelle steuern lassen. So lässt sich auch die enge Verzahnung der Mengen- und Gütemodelle ermöglichen und Darstellungen probabilistischer Ergebnisse verwirklichen (siehe Abbildung 6).

Die Wuppertalsperre ist eine Brauchwassertalsperre und dient hauptsächlich der Abflusssteuerung bzw. Niedrigwasseraufhöhung und dem Hochwasserschutz der Wupper. Darüber hinaus bietet sie Möglichkeiten für Erholung und Freizeitaktivitäten. Die Wuppertalsperre gehört zu einem Verbund von Talsperren im Oberlauf der Wupper. Wichtigste Herausforderungen beim Wassermanagement (Wassermenge und –güte) im Untersuchungsgebiet sind folgende: Ausreichende Hochwasserschutzräume bei Hochwasserereignissen, Ausreichende Kapazität zur Niedrigwassererhöhung der Wupper im Unterlauf mit primärem Zweck des Ausgleichs anthropogener Einflüsse und die Sicherstellung von benthischen Lebensgemeinschaften, Auftreten von Cyanobakterienblüten während heißer Sommerzeiten und starker Abnahme des Wasserspiegels und Optimierung der Bewirtschaftung sowohl der Wassermenge als auch der Wassergüte durch den Verbund der Talsperren.

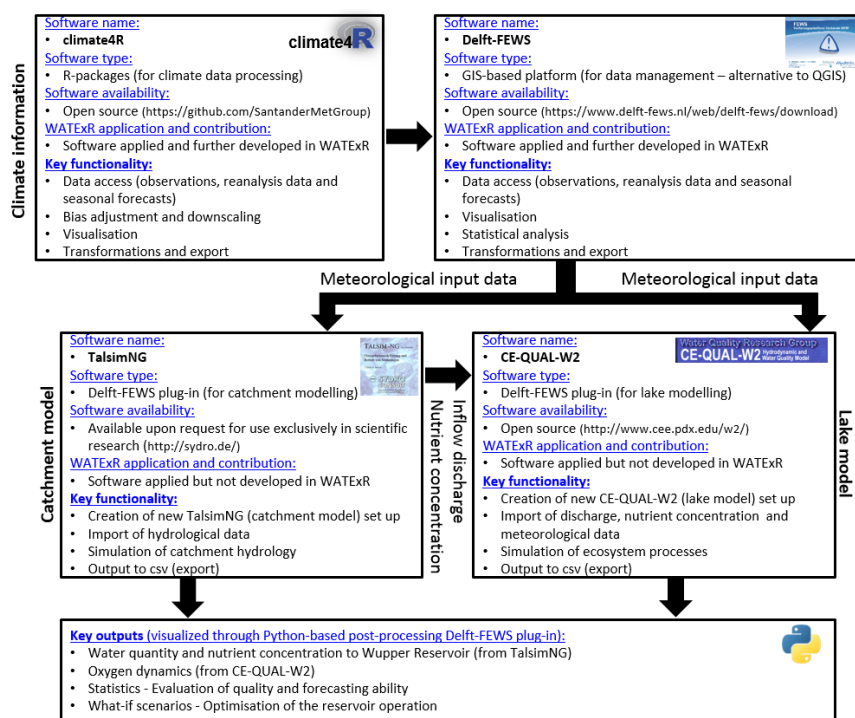


Abb. 6: Der Workflow zur Ermöglichung von saisonalen Vorhersagen für die Wuppertalsperre - climate4R (siehe Iturbide 2019)

Literatur

- Iturbide, M., Bediab J., Herrera, S., Baño-Medina, J., Fernández, J., Frías, M.D., Manzanas, R., San-Martín, D., Cimadevilla, E., Cofiño, A.S., Gutiérrez, J.M., 2019. The R-based climate4R open framework for reproducible climate data access and post-processing. *Environmental Modelling and Software*, 111, 42-54.
- Oestermann, F., 2019. Bewertung von extremen Trockenperioden und deren Einfluss auf die Talsperrenbewirtschaftung. Bachelorarbeit, Hochschule Bochum und Wupperverband. Unveröffentlicht
- WMO (World Meteorological Organization), 2016. Handbook of Drought Indicators and Indices. (<https://public.wmo.int/en/resources/library/handbook-of-drought-indicators-and-indices>)

Das Potential der Kombination von Maschinellen Lernen und Agenten-basierter Methoden in der Wasserbewirtschaftung

Benjamin Mewes, Andreas Schumann

Zusammenfassung

Die Beschreibung komplexer Systeme benötigt Modellansätze, die in der Lage sind dynamische Interaktionen zu beschreiben und zudem chaotische Komponenten darstellen können, die durch wechselnde Wirkungszusammenhänge entstehen. Agenten-basierte Modelle ermöglichen es, komplexe dynamische Systeme nachzubilden und werden häufig dort eingesetzt, wo das Verhalten und das Zusammenspiel einzelner Akteure von Wichtigkeit sind. Besonders in gekoppelten sozio-hydrologischen Modellen ist dieser Modelltypus verbreitet.

Agenten-basierte Modelle leiden jedoch unter der starken Abstraktion und der mangelnden Dynamik in der Adaption an neue Umgebungen, die nicht explizit im Regelwerk des Verhaltens der Agenten definiert sind. Um diesen Makel zu begrenzen, wird hier ein wasserwirtschaftliches Agenten-basiertes Modell der Bewässerungsplanung um eine Lernfunktion erweitert, die mit Hilfe des maschinellen Lernens hydrologische Situationen erkennt, einordnet und die daraus resultierenden Reaktionen adaptiert. Damit kann ohne weitere Veränderungen der Randbedingungen und Modellkomponenten eine Strategieentwicklung der Agenten beobachtet werden und der Ertrag aus der Bewässerungslandwirtschaft um 25% erhöht werden.

1. Einleitung

Durch die hohe Verfügbarkeit von Daten im Informationszeitalter ist der Bedarf an neuartigen Modelltechniken und Analysemethoden gestiegen, um aus den gewonnenen Daten Information zu gewinnen. Hierzu wurden dazu unter anderem die Anwendungen des Maschinellen Lernens (ML) entwickelt, die große Datenmengen zu Informationen verarbeiten können (Shen et al., 2018). Dabei versucht ein Algorithmus auf Basis von Erfahrung durch Training einen Datensatz zu analysieren, das zugrundeliegende Muster zu identifizieren und auf einen unbekanntem Datensatz anzuwenden, beziehungsweise einen Wert vorherzusagen (Mitchell, 2010). Diese Ansätze finden Anwendung in einem breiten Themenfeld der Hydrologie und reichen von der Vorhersage von Abflüssen (Solomatine and Ostfeld, 2008), bis hin zur Datenassimilierung (Tabari et al., 2012) und Feldfruchtbestimmung auf der Plotskale mittels Fernerkundung (Zheng et al., 2015). Durch die nicht vorgegebene Struktur haftet den Ansätzen jedoch schnell das Urteil der Beliebigkeit an: Die Ergebnisse stehen in der Kritik eine Black-Box zu repräsentieren (Shen et al., 2018). Das Gegenteil zu daten-gestützten Black-Box Modellen stellen regel-basierte White-Box Modelle, wie z.B. Agenten-Modelle dar. Diese Modelltechnik fußt auf der Annahme, dass ein System in abgeschlossene, autonome Entitäten zerlegt werden kann, die sich gegenseitig wahrnehmen und in einem Austausch miteinander stehen (Macal and North, 2010). In der Vergangenheit wurde dieser Modellansatz vorrangig in der Sozio-Hydrologie genutzt, um das Verhalten von Akteuren in wasserwirtschaftlichen Modellen zu modellieren (Gunkel, 2005; Troy et al., 2015; Lansing et al., 2017). Allerdings können auch prozesshydrologische Modelle mittels Agenten-basierter Modellierung aufgebaut werden (Mewes und Schumann, 2018).

Großer Kritikpunkt an den Agenten-basierten Modellen bleibt die Unvollständigkeit des Regelwerks, beziehungsweise das starke Maß der Abstraktion (Bruch and Atwell, 2015). In wasserwirtschaftlichen (oder hydrologischen) Modellen kann nicht zwangsläufig das Regel-

werk des modellierten Systems vollständig aufgebaut werden, daher ist eine automatisierte Regeldefinition innerhalb des Agenten-basierten Modells erforderlich.

In diesem Beitrag wird exemplarisch ein wasserwirtschaftliches Verteilungsmodell für Reiskulturen des mittelalterlichen Bali aufgebaut (Lansing, 2007). Dort wurde über Jahrhunderte ein Kult um das Wasser zur Bewässerung von Reisfeldern entwickelt. Dies ist besonders von Interesse, da durch die Übersetzung von Bewässerungs- und Ernteregeln in religiöse Praktiken ein natürlicher Pflanzenschutz entwickelt werden konnte. Gleichzeitige Ernten entzogen den Krankheitserregern den Wirt und somit konnte die Ausbreitung der Krankheiten in den Reisfeldern eingedämmt und Ernteverluste minimiert werden. Die Interaktionen zwischen dem religiösen Zentrum des Kults, dem Tempel, und den angeschlossenen Bauern wird mittels eines Agenten-basierten Modells nachgebildet. Durch den Einbezug des Maschinellen Lernens wird wiederum die erforderliche Strategie in ihrer Evolution modelliert. Dies führt dazu, dass das Agenten-basierte Modell dynamisch während der Laufzeit auf Änderungen der Umwelt reagieren kann und somit die Strategie anpassen kann.

2. Methoden

2.1 Agenten-basierte Modellierung

Agenten sind in sich abgeschlossene, autonome Softwareeinheiten, die auf Basis eines definierten Regelwerkes eine Strategie verfolgen, um ein Ziel zu erreichen (Macal and North, 2010; North, 2014). Durch Sensoren und Aktoren stehen die Agenten dabei in einem Austausch mit ihren Nachbarn und ihrer Umwelt.

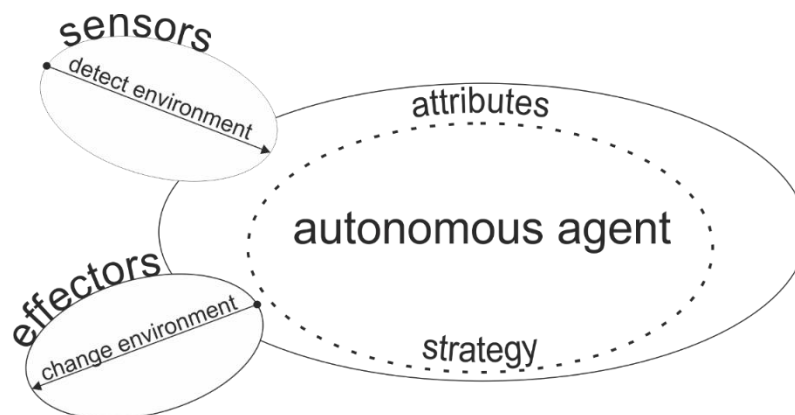


Abb. 1: Struktur eines Software Agenten, der mittels Sensoren und Aktoren im Austausch mit seiner Umwelt sowie seinen Nachbarn steht.

Das Regelwerk zur Verfolgung der Strategie muss a-priori ausformuliert werden und folgt dabei dem Wenn-Dann-Muster mit Schwellwerten, die ein gewisses Verhalten auslösen. Neben den Interaktionen muss auch die Umwelt und die Wahrnehmung der Umwelt beschrieben werden. Hier hilft es, dass der Agent sowohl eine räumliche als auch eine zeitliche Dimension hat. Überschneidungen mit der Umwelt können somit als räumliche Repräsentation des Einflusses dargestellt werden. Die Interaktion mit anderen Agenten derselben Klasse wird hingegen weitläufig in Form eines gerichteten Graphen dargestellt und analysiert.

2.2 Maschinelles Lernen

Maschinelles Lernen ist das Hyperonym für Algorithmen, die Strukturen in Daten erkennen, als Muster extrahieren und auf Basis dieser Erkenntnisse unbekannte Daten analysieren (Kelleher et al., 2015). Dabei stehen verschiedene Algorithmen zur Verfügung, die jeweils unterschiedliche Einsatzzwecke und Anwendungsfelder haben: Künstliche neuronale Netze (zur Vorhersage beispielsweise von Abflüssen) oder Support Vector Machines (zur Analyse von Fernerkundungsdaten). In dieser Anwendung wird der *k*-means Algorithmus eingesetzt, der vorrangig zur Datenanalyse eingesetzt wird und ohne Trainingsdaten die vorhandenen Daten in eine definierte Menge an Clustern einteilt (Han and Kamber, 2010). Dadurch sind die Agenten in der Lage Situationen zu erkennen und ihr Verhalten, beziehungsweise ein modellweites Verhalten, an die jeweilige Situation anzupassen.

2.3 Balinesisches Wasserbewirtschaftungsmodell

Das Balinesische Wasserbewirtschaftungsmodell besteht aus einem Tempel, der Wasser zur Bewässerung an angeschlossene Bauern verteilt, und den zugehörigen Bauern, die ihr Wasser vom Tempel erhalten und auf ein gemeinsames Zeichen mit der Reisernte flächig beginnen. Letzteres hat den Grund, dass durch die gemeinsame Ernte den Parasiten und Krankheiten in den Reisfeldern der Wirt entzogen wird (Lansing, 2007). Dies führte dazu, dass bereits im Mittelalter auf Bali ein effektiver Pflanzenschutz betrieben werden konnte, der nachweislich höhere Erträge bringt, als Pflanzenschutz mit modernen Pesti- und Fungiziden.

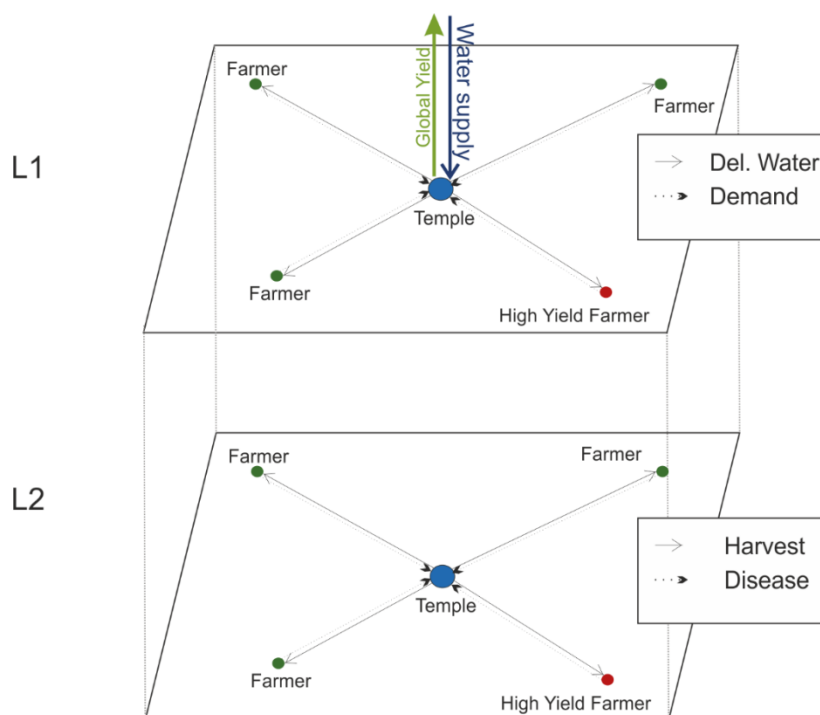


Abb. 2: Aufbau des Agenten-basierten Wasserbewirtschaftungsmodells nach Balinesischem Vorbild unterteilt in zwei Kommunikationsebenen.

Um das wasserwirtschaftliche Modell nach Balinesischem Vorbild mittels Software Agenten aufzubauen, bedarf es eines zweischichtigen Modells. Der Tempel verteilt auf Ebene L1 das

Wasser. Auf derselben Ebene melden die Bauern ihren Wasserbedarf an. Die Ebene L2 stellt eine Kommunikationsmetaebene dar, auf der die Kommunikationssignale prozessiert werden. So gibt der Tempel auf dieser Ebene das Signal zur gemeinsamen Ernte wenn das maximale Krankheitsniveau D einen Schwellwert übersteigt. Damit das Krankheitsniveau für die Organisationseinheit erfasst werden kann, meldet jede Reisplantage dem Tempel den aktuellen Befall.

Je nach angebauter Kultur variiert der zu erwartenden Ertrag. Der Tempel entscheidet wie viele der Felder mit einer Hohertragsorte bestückt werden. Die ertragsreichen Reissorten verdoppeln den Ertrag, benötigen jedoch mehr Wasser und sind anfälliger für Krankheiten, hier gegeben durch $D(t)$ wobei t für den Monat steht und c den Ertragskoeffizienten darstellt.

$$D(t) = \frac{1}{1 + c \cdot e^{-t}}$$

Der Ertragskoeffizient c variiert dabei zwischen 1 (normal tragende Reispflanze) und 2 (Hohertragspflanze). Übersteigt $D(t)$ eine festgelegte Schadschwelle (in diesem Falle 0,9 Schadenseinheiten), verlieren die Bauern ihre gesamte Ernte an den Parasit. Zu früh darf die Ernte ebenfalls nicht eingefahren werden, da sonst die Erträge hinter den Erwartungen zurückbleiben. Daher muss zunächst ein maximaler Akzeptanzwert für die Krankheitsbelastung definiert werden.

Die Vegetationsphase dauert 6 Monate. In diesem vereinfachten Modell kann nur eine Aussaat erfolgen. Die Wasserverfügbarkeit folgt einem tropischen Regenzeitenmuster mit ausgeprägter Regenphase, das jedoch mit Hilfe einer Zufallsfunktion zeitlich variiert wird. Der Tempel hält eine gewisse Menge Wasser vor, sodass der Bedarf in Dürrezeiten kurzfristig gedeckt werden kann.

$$S_{Tempel} = \min(S_i, 2)$$

Der Speicher des Tempels S_{Tempel} entspricht dabei dem Minimum des aktuellen Speicherinhaltes S_i nach Zufluss und Abgabe und der maximalen Speichermenge von 2 Wassereinheiten.

2.4 Lernvorgang in Agenten-basierten Wasserwirtschaftsmodell

Das zuvor beschriebene Modell beinhaltet bereits die White-Box-Modellmethode der Agenten-basierten Modellierung. Allerdings laufen hier die Prozesse noch über definierte, starre Schwellwerte ab, ohne dass mehr Wissen über das System zu einer Adaption des Verhaltens der Agenten führt. Mit Hilfe dieses starren Modells wäre keine Aussage über die Entwicklung der Strategie aller Akteure möglich. Um dies zu ändern, erhält der Tempel-Agent mit dem *k-means*-Algorithmus eine Möglichkeit, ähnliche hydrologische Situationen zu erkennen und sein Verhalten daran zu adaptieren.

Für den *k-means*-Algorithmus wurden 1.000 synthetische Läufe erzeugt. Die Entscheidungen des Tempels bezüglich des maximalen Schwellenwerts von $D(t)$ und des Anteils der Hohertragsanbauggebiete in Hinsicht eines maximalen Ernteertrages bei spezifischen hydrologischen Situationen wurden durch Trial & Error getroffen. Diese synthetischen Läufe wurden mittels *kmeans* in vier Gruppen eingeteilt und auf vereinfachte Handlungsoptionen reduziert (siehe Tabelle 1). Einmal pro Jahr analysiert der Tempel die aktuelle hydrologische Si-

tuation und passt die Verteilung der Hohertragsfelder sowie den akzeptablen Schwellenwert für $D(t)$ an, um die Ernte zu maximieren und das Risiko des Totalverlusts zu minimieren. Mit jedem zusätzlichen Jahr, steigt die Lernmenge und neue hydrologische Situationen werden dem Pool an Trainingsdaten zugeführt.

Tab.1: Handlungsoptionen bei erkannten hydrologischen Situationen

Nr.	Option	Hydrologische Situation
1	Schwellenwert $D(t)$ erhöhen	Hohe Wasserverfügbarkeit, hohe Anzahl von Hohertragsfeldern
2	Schwellenwert $D(t)$ senken	Hohe Wasserverfügbarkeit, niedrige Anzahl von Hohertragsfeldern
3	Anzahl Hohertragsfelder erhöhen	Hohe Wasserverfügbarkeit, niedrige Anzahl von Hohertragsfeldern
4	Anzahl Hohertragsfelder absenken	Niedrige Wasserverfügbarkeit, hohe Anzahl Hohertragsfeldern

3. Ergebnisse

Vergleicht man die Ergebnisse des lernenden Agenten-Modells mit den Ergebnissen des nicht-lernenden Agenten-Modells, wird deutlich, dass sich das lernfähige Modell besser an die verändernden Situationen anpasst und die Resilienz der modellierten Gesellschaft zunimmt. Dürren können erkannt und eine Hochrisikostrategie mit einem hohen Akzeptanzschwellen für $D(t)$ kombiniert mit einem hohen Anteil von Hohertragsfeldern wird vermieden. Ohne Lernfunktion können nur 20% - 25% der potenziell möglichen Ernte geerntet werden. Mit Lerneffekt steigt die Quote auf ca. 53% an. Dabei kommt es in 60% - 70% der beobachteten Jahre zu einer Adaption des Verhaltens des Tempels. Je mehr Jahrgänge in der Lernphase mit inkludiert werden, desto höher ist der Anteil der tatsächlich eingefahrenen Ernte an der potentiell möglichen Ernte. Im Schnitt werden auf 2,3 Feldern von 4 Feldern Hohertragsarten angepflanzt. Die niedrigste Akzeptanzschwelle von $D(t)$ liegt bei 80% der Schadschwelle. 20% Restrisiko verbleiben und noch vom Tempel akzeptiert.

Die Einordnung der Situation zu den jeweiligen Handlungsoptionen mittels *k-means* bleibt über die Laufzeit des Modells stabil, verändert sich jedoch für einzelne Situationen über den Modelllauf. Durch die große Anzahl der Modellläufe (am Ende 2700) war es nicht möglich die Genese der Gruppen in jedem Teilschritt nachzuvollziehen. Es bilden sich jedoch Kerngruppen an Situationen und Reaktionen heraus, die die Reaktionen in Tabelle 1 widerspiegeln.

4. Diskussion

Die Steigerungen des Ertrages zeigen die Funktionalität der Lernroutine in diesem wasserwirtschaftlichen Modell. Es konnte ohne weitere Optimierung während der Laufzeit die Ertragssituation um knapp 25% gesteigert werden. Dabei wurden allein Muster verwendet, die durch die Software-Agenten erkennbar waren. Eine derartige Evolution von Strategien ist in starren Modellkomplexen sonst nicht zu erreichen. Die Hinzunahme des *k-means*-

Algorithmus hat die Rechendauer 2700 konsekutiver Modelldurchläufe von 43s auf 1min 12s erhöht. Dies ist in einem vertretbaren Rahmen und enthält den Kaltstart eines Modells mit Re-Analyse der einzelnen Durchläufe. Im Kern ist die Lernkomponente eine Nachjustierung des Modells während der Laufzeit ohne Veränderung der grundsätzlichen Strukturen bei gleichbleibenden Randbedingungen. Durch das klare Regelwerk aus der Agenten-basierten Modellierung können die einzelnen Aktionen nachvollzogen werden, lediglich die Einteilung der Situationen in Reaktionsklassen (siehe Tab. 1) wird in die Black-Box verschoben.

5. Fazit und Ausblick

Die Verknüpfung von maschinellem Lernen und Agenten-basierter Modellierung hat sich als sinnvoll für den Einsatz in evolutionären Modellen erwiesen. Es konnte anhand eines Agenten-basierten, durch Erfahrung lernenden Modells eine Optimierung einer Bewässerungsstrategie erreicht werden, ohne dass die Modellstrukturen verändert werden mussten. Diese Optimierung kann aufgrund der Implementierung in die Modellstruktur während der Laufzeit erfolgen.

Literatur

- Bruch, E., Atwell, J., 2015. Agent-Based Models In Empirical Social Research. *Sociological methods & research* 44 (2), 186–221.
- Gunkel, A., 2005. The application of multi-agent systems for water resources research—Possibilities and limits. Master Thesis, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Freiburg, Germany.
- Han, J., Kamber, M., 2010. *Data mining. Concepts and techniques*. Elsevier, Amsterdam.
- Kelleher, J. D., Mac Namee, B., D'Arcy, A., 2015. *Fundamentals of machine learning for predictive data analytics: algorithms, worked examples, and case studies*. MIT Press.
- Lansing, J. S., 2007. *Priests and programmers. Technologies of power in the engineered landscape of Bali*. Princeton University Press, Princeton, N.J.
- Lansing, J. S., Thurner, S., Chung, N. N., Coudurier-Curveur, A., Karakaş, Ç., Fesenmyer, K. A., Chew, L. Y., 2017. Adaptive self-organization of Bali's ancient rice terraces. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114 (25), 6504–6509. <http://www.pnas.org/content/pnas/114/25/6504.full.pdf>.
- Macal, C. M., North, M. J., 2010. Tutorial on agent-based modelling and simulation. *Journal of Simulation* 4 (3), 151–162.
- Mewes, B., Schumann, A. H., 2018. IPA (v1). A framework for agent-based modelling of soil water movement. *Geoscientific Model Development* 11 (6), 2175–2187. <https://www.geosci-model-dev.net/11/2175/2018/>.
- Mitchell, T. M., 2010. *Machine learning*. McGraw-Hill, New York, NY.
- North, M. J., 2014. A theoretical formalism for analyzing agent-based models. *Complex Adaptive Systems Modeling* (2), 3.
- Shen, C., Laloy, E., Albert, A., Chang, F.-J., Elshorbagy, A., Ganguly, S., Hsu, K.-L., Kifer, D., Fang, Z., Fang, K., Li, D., Li, X., Tsai, W.-P., 2018. HESS Opinions. Deep learning as a promising avenue toward knowledge discovery in water sciences. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 2018, 1–21.

- Solomatine, D. P., Ostfeld, A., 2008. Data-driven modelling. Some past experiences and new approaches. *J Hydroinform* 10 (1), 3–22.
- Tabari, H., Kisi, O., Ezani, A., Hosseinzadeh Talaei, P., 2012. SVM, ANFIS, regression and climate based models for reference evapotranspiration modeling using limited climatic data in a semi-arid highland environment. *Journal of Hydrology* 444, 78–89.
- Troy, T. J., Konar, M., Srinivasan, V., Thompson, S., 2015. Moving sociohydrology forward: a synthesis across studies. *Hydrology and Earth System Sciences* 19 (8), 3667–3679.
- Zheng, B., Myint, S. W., Thenkabail, P. S., Aggarwal, R. M., 2015. A support vector machine to identify irrigated crop types using time-series Landsat NDVI data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 34, 103–112.

Verzeichnis der Autoren

Aigner, Dirk, HYDRON Ingenieurgesellschaft für Umwelt und Wasserwirtschaft mbH, Ritterstraße 9, 76137 Karlsruhe, dirk.aigner@hydron-gmbh.de

Bölscher, Jens, Dr., Freie Universität Berlin, Fachbereich Geowissenschaften, Angewandte Geographie, Umwelthydrologie und Ressourcenmanagement / Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz, Abteilung II Integrativer Umweltschutz, Referat II B Wasserwirtschaft, Wasserrecht, Geologie

Braun, Mark, Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RWTH Aachen (FiW) e. V., Kackertstraße 15-17, 52056 Aachen, braun@fiw.rwth-aachen.de

Bremicker, Manfred Dr., Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, Griesbachstr. 1, 76185 Karlsruhe, manfred.bremicker@lubw.bwl.de

Chen, Siling, M. Sc., biota - Institut für ökologische Forschung und Planung GmbH, Nebelring 15, D-18246 Bützow, Siling.Chen@institut-biota.de; Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Leibniz Universität Hannover, Appelstr. 9A, D-30167 Hannover, svyling@gmail.com

Costa-Patry, Dr. Etienne, IAV GmbH, Carnotstraße 1, 10587 Berlin, etienne.costa-patry@iav.de

Eckardt, Dr. Daniel, IAV GmbH, Development Center, Rockwellstraße 16, 38518 Gifhorn, daniel.eckardt@iav.de

Falk, Dimitri, Emschergenossenschaft/Lippeverband (EGLV), Kronprinzenstr. 24, 45128 Essen, falk.dimitri@eglv.de

Förster, Kristian, Juniorprofessor Dr.-Ing., Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Leibniz Universität Hannover, Appelstr. 9A, D-30167 Hannover, foerster@iww.uni-hannover.de

Fuchs, Dipl.-Ing. Gabriele, Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, Abteilung I/4, Marxergasse 2, 1030 Wien, Österreich, gabriele.fuchs@bmnt.gv.at

Grundmann, Jens, Dr.rer.nat., Technische Universität Dresden, Professur Hydrologie, Bergstr. 66, 01062 Dresden, jens.grundmann@tu-dresden.de

Haag, Ingo Dr.-Ing, HYDRON Ingenieurgesellschaft für Umwelt und Wasserwirtschaft mbH, Ritterstraße 9, 76137 Karlsruhe, ingo.haag@hydron-gmbh.de

Hanzer, Florian, PhD, Universität Innsbruck, Institut für Geographie, Innrain 52f, A-6020 Innsbruck, Österreich; Wegener Center für Klima und Globalen Wandel, Brandhofgasse 5/ 1. Stock, A-8010 Graz, Österreich, florian.hanzer@uibk.ac.at

Hoerhan, Dipl.-Ing. Thomas, Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, Abteilung I/3, Marxergasse 2, 1030 Wien, Österreich, thomas.hoerhan@bmnt.gv.at

Holzendorf, Sven, IAV GmbH, Carnotstraße 1, 10587 Berlin, sven.holzendorf@iav.de

Hübner, Gerd, Dr., Bundesanstalt für Gewässerkunde, Am Mainzer Tor 1, 56068 Koblenz, huebner@bafg.de

Imjela, Rabea, Dipl.-Geogr., Freie Universität Berlin, Fachbereich Geowissenschaften, Malteserstraße 74-100, 12249 Berlin, Tel.: 030 / 83870236, rabea.imjela@fu-berlin.de

Krumm, Julia, HYDRON Ingenieurgesellschaft für Umwelt und Wasserwirtschaft mbH, Ritterstraße 9, 76137 Karlsruhe, julia.krumm@hydron-gmbh.de

Kutschera, Dr. Gesa, Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RWTH Aachen (FiW) e. V., Kackertstraße 15-17, 52056 Aachen, kutschera@fiw.rwth-aachen.de

Langeheinecke, Prof. Dr. Kay-Jochen, IAV GmbH, Development Center, Rockwellstraße 16, 38518 Gifhorn, kay-jochen.langeheinecke@iav.de

Lehmann, Kerstin, Dipl.-Ing., Technische Universität Dresden, CIMTT Zentrum für Produktionstechnik und Organisation, Bergstr. 66, 01062 Dresden, kerstin.lehmann@tu-dresden.de

Pätsch, Dr. Matthias, IAV GmbH, Development Center, Rockwellstraße 16, 38518 Gifhorn, matthias.paetsch@iav.de

Pfister, Angela, Emschergenossenschaft/Lippeverband (EGLV), Kronprinzenstr. 24, 45128 Essen, pfister.angela@eglv.de

Regenauer, Julianna, HYDRON Ingenieurgesellschaft für Umwelt und Wasserwirtschaft mbH, Ritterstraße 9, 76137 Karlsruhe, julianna.regenauer@hydron-gmbh.de

Reinhardt-Imjela, Christian, Dr., Freie Universität Berlin, Fachbereich Geowissenschaften, Angewandte Geographie, Umwelthydrologie und Ressourcenmanagement, Malteserstraße 74-100, 12249 Berlin, Tel.: 030 / 83870353, christian.reinhardt-imjela@fu-berlin.de

Röhm, Patric, Dipl. Geograph, Technische Universität Dresden, Professur Hydrologie, Bergstr. 66, 01062 Dresden, patric.roehm@tu-dresden.de

Schache, Judith, M. Sc., Technische Universität Dresden, Professur Hydrologie, Bergstr. 66, 01062 Dresden, judith.schache@tu-dresden.de

Schimetzek, Vera, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, Leibnizstr. 10, 45659 Recklinghausen, vera.schimetzek@lanuv.nrw.de

Schulte, Achim, Prof. Dr., Freie Universität Berlin, Fachbereich Geowissenschaften, Angewandte Geographie, Umwelthydrologie und Ressourcenmanagement, Malteserstraße 74-100, 12249 Berlin, Tel.: 030 / 83870252, achim.schulte@fu-berlin.de

Schwandt, Daniel, Dr., Bundesanstalt für Gewässerkunde, Am Mainzer Tor 1, 56068 Koblenz, schwandt@bafg.de

Sieber, Angela, Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, Griesbachstr. 1, 76185 Karlsruhe, angela.sieber@lubw.bwl.de

Steinbrich, Andreas, Professur für Hydrologie der Universität Freiburg, Friedrichstraße 39 79098 Freiburg, andreas.steinbrich@hydrology.uni-freiburg.de

Tabatabaei, Sajjad, Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RWTH Aachen (FiW) e. V., Kackertstraße 15-17, 52056 Aachen, sajjad.tabatabaei@fiw.rwth-aachen.de

Treis, Adrian, Emschergenossenschaft/Lippeverband (EGLV), Kronprinzenstr. 24, 45128 Essen, treis.adrian@eglv.de

Weiler, Markus Prof. Dr., Professur für Hydrologie der Universität Freiburg, Friedrichstraße 39, 79098 Freiburg, markus.weiler@hydrology.uni-freiburg.de

Wolf, Nils Dr. rer. nat., EFTAS Fernerkundung Technologietransfer GmbH, Oststraße 2-18, 48145 Münster, nils.wolf@eftas.com

Schriftenreihe Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung

Bisher erschienene Hefte

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

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

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

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

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

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

Heft 41.19 Information und Organisation in der hydrologischen Forschung und Praxis.
Beiträge zum Tag der Hydrologie am 28./29. März 2019 am Karlsruher Institut für Technologie.
Herausgeber: Erwin Zehe, Kirsten Hennrich, Uwe Ehret, Sibylle Hassler, Manuela Nied,
Ulrike Scherer
166 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-88721-821-8
DOI: 10.14617/for.hydrol.wasbew.41.19

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