



Pumpwerkswarnung für Starkregen und Hochwasser im urbanen Raum (PuwaSTAR)



Teil I: Kurzbericht Universität Siegen

Verbundkoordinator:

Lippeverband (LV)
Kronprinzenstr. 24
45128 Essen

Auftrag vom:

10/2023

Förderkennzeichen:

13N16802

Aufgestellt von:

Univ.-Prof. Dr. phil. habil. Jorge Leandro
Sebastian Ramsauer M.Sc.

Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu)
der Universität Siegen

Siegen, den 11.06.2026

PuwaSTAR - Kurzbericht

Stand der Forschung und Zielsetzung

Zum Zeitpunkt des Projektantrages basieren operative Hochwasservorhersagen hauptsächlich auf Niederschlag-Abfluss-Modellen, die hydrologische Prozesse anhand von physikalisch-mathematischen Gleichungen realitätsnah berechnen können. Diese Modelle ermöglichen zwar eine zeitnahe Berechnung von Abflüssen und eine Ableitung von Wasserständen über eine Abfluss-Wasserstand-Beziehung, jedoch können räumliche Überflutungsflächen und Wassertiefen nicht dargestellt werden. Für die Bereitstellung dieser Informationen werden i.d.R. gekoppelte ein- und zweidimensionale hydrodynamische Modelle (1D/2D) eingesetzt. Diese Modelle ermöglichen eine detaillierte Abbildung der Wasserausbreitung, sind aufgrund ihrer Rechenintensität aber nicht für zeitkritische, operative Vorhersagen nutzbar. Aus diesem Grund ist nach Stand der Technik zum Zeitpunkt des Projektbeginns keine zielgerichtete Maßnahmenplanung für Echtzeit-Ereignisse möglich, was im Fall eines Hochwassers ein enormes Risiko für Mensch und Gut bedeuten kann. Der mögliche Ausfall von Pumpwerken mit erheblichen Auswirkungen auf die Überflutungsflächen im urbanen Raum verschärft diese Problematik zudem. Datengetriebene Modelle wie künstliche neuronale Netze (KNN) zeichnen sich durch eine deutlich höhere Recheneffizienz aus und haben daher in den vergangenen Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Im Gegensatz zu klassischen 1D/2D-Modellen können KNN innerhalb von nur wenigen Sekunden bis Minuten aussagekräftige Überflutungskarten liefern, die im Ereignisfall eine zeitnah fundierte Entscheidung auf Grundlage aktueller Überflutungskarten ermöglichen. Im hydrologischen und hydraulischen Bereich werden künstliche neuronale Netze bereits vielfältig eingesetzt. Das Potenzial solcher Modelle wurde zwar in zahlreichen Studien bewiesen, jedoch wurden die Integration in operative Vorhersagesysteme und die Betrachtung von Pumpwerksausfällen noch nicht untersucht. Somit wurden im Projekt ausstehende Forschungsfragen untersucht, die für zielgerichtete Hochwassereinschätzung maßgebend sind. Folglich hatte das Verbundvorhaben PuwaSTAR zum Ziel, auf Basis von künstlicher Intelligenz ein Vorhersagesystem von Überflutungsflächen und -tiefen unter Berücksichtigung von Pumpwerksausfällen zu entwickeln. Neben Niederschlags- und Abflussvorhersagen wurden die aktuelle Leistungskapazität des Pumpwerks, sowie potenzielle Ausfallszenarien berücksichtigt.

Projektablauf

Die methodische Grundlage des Projekts bildete die Aufbereitung der Niederschlags-Abfluss-Szenarien aus dem hydrologischen Modell und das Aufstellen eines gekoppelten 1D/2D-Überflutungsmodells, die für das Training des datengetriebenen Modells verwendet wurden. Für die Berücksichtigung von Pumpwerksausfällen, wurden signifikante Ausfallszenarien abgeleitet und die zugehörigen Ausfallwahrscheinlichkeiten unter Anwendung probabilistischer Methoden quantifiziert. Auf dieser Datenbasis wurde ein KI-gestütztes Modell zur zweidimensionalen Überflutungsvorhersage entwickelt und trai-

niert, in welches die definierten Ausfallszenarien als Eingangsgrößen integriert wurden. Das resultierende Vorhersagemodul wurde in einem weiteren Schritt in die operationelle Echtzeit-Plattform Delft-FEWS eingebunden und damit für den operativen Einsatz im Hochwasserwarndienst erschlossen. Ergänzend zu den modellbasierten Arbeiten wurden in enger Kooperation mit den assoziierten Praxispartnern Endnutzeranforderungen systematisch erhoben sowie Vorsorgestrategien und Organisationskonzepte für den Bereich des Katastrophenschutzes entwickelt. Die übergeordnete Projektkoordination sowie die zielgruppengerechte Dissemination der Forschungsergebnisse erfolgten projektbegleitend über die gesamte Laufzeit.

Ergebnisse

Als Ergebnis wurde ein Pumpenausfalltool entwickelt, das die Ausfallwahrscheinlichkeiten jeder Pumpe in einem Pumpwerk bestimmt und anhand dessen die Auftretenswahrscheinlichkeit der wesentlichen Ausfallszenarien abgeleitet werden kann. Hierzu wurden auf Grundlage einer systematischen Datenerhebung mittels Literaturrecherche und einer Befragung zu zehn verfügbaren Pumpenstandorten im Em-scher/Lippe-Gebiet signifikante Ausfallmechanismen identifiziert. Die ermittelten empirischen Ausfallwahrscheinlichkeiten wurden in einem gerichteten azyklischen Graphen (Bayes'sches Netzwerk) abgebildet, das die bedingten Abhängigkeiten zwischen Versagensmechanismen probabilistisch beschreibt. Anschließend werden alle signifikanten Szenarien auf Basis der verbleibenden Restpumpkapazität des Pumpwerkes abgeleitet. Für jedes der Szenarien wurde ein spezifisch trainiertes KNN anhand von über 360 hydraulischen Simulationsszenarien aufgestellt, das dynamisch die maximale Wassertiefe der zukünftigen 24 Stunden in Echtzeit voraussagen kann. Für die Datenaufbereitung wurde mit der TU Braunschweig zusammengearbeitet, um disaggregierte Klimaprojektionsdaten für das Training zu erstellen. Die Modellevaluation erfolgte anhand von 56 Testereignissen, die sich in 1.111 Vorhersagefenster untergliedern. Die Ergebnisse zeigen ein geringes mittleres Fehlermaß zwischen 0,024 m und 0,044 m für den RMSE, sowie zwischen 0,007 m und 0,010 m für den MAE. Der CSI übersteigt in allen Szenarien den Wert von 0,95 und erreicht für den Vollpumpbetrieb ein Maximum von 0,967, was eine akkurate Vorhersage der Überflutungsausdehnung widerspiegelt. Die relativen Volumenabweichungen (RVE) bewegen sich zwischen 0,002 und 0,011 und indizieren eine genaue Vorhersage des Überflutungsvolumens mit lediglich geringer Unterschätzungstendenz. Für die Integration in das bestehende Vorhersagesystem Delft-FEWS, wurden zwei Varianten entwickelt. Die erste Variante nutzt Echtzeit-Betriebszustände der Pumpen zur Szenariobestimmung und liefert auf Basis von Niederschlags- und Abflussvorhersagen der nächsten 24 Stunden eine Überflutungsvorhersage. Die zweite Variante ersetzt die Echtzeit-Aufzeichnungen durch die berechneten Ausfallwahrscheinlichkeiten des Bayes'schen Netzwerkes und ermöglicht so eine probabilistische Szenariobewertung. Um die Projektergebnisse zugänglich zu machen, wurden diese in mehreren Fachbeiträgen veröffentlicht und auf nationalen wie internationalen Konferenzen präsentiert. Der Quellcode des datengetriebenen Modells wurde zudem auf GitHub veröffentlicht.