

ESF Nachwuchsforschergruppe

EXTRUSO

Projektlaufzeit 01.07.2016 – 30.06.2019

SAB-Projektnummer 100270097

ZWISCHENBERICHT

MAI 2018

1. EINLEITUNG

Der Klimawandel führt zu Änderungen des Wasserkreislaufs, die zukünftig ein verstärktes Auftreten von Extremereignissen wie Trockenheit, Starkregen oder Hochwasser mit zum Teil erheblichen zivilen und ökonomischen Schadenswirkungen erwarten lassen. Aktuelle Arbeiten konzentrieren sich dabei primär auf die Untersuchung und letztlich die Steigerung der Resilienz großer Einzugsgebiete (EZG). Hydro-meteorologische Extremereignisse, die sich aus kurzen, sehr intensiven Starkregenereignissen ergeben, treten jedoch meist kleinräumig auf und sind dort schwierig zu beobachten. Insbesondere fehlt es an ausreichend dichten Beobachtungsnetzen und Modellierungsmethoden als Grundlage für die Schaffung von Warnsystemen in kleineren Einzugsgebieten.

Das EXTRUSO-Projekt setzt an dieser Stelle an und untersucht am Beispiel kleiner und mittlerer Einzugsgebiete innovative Techniken zur räumlich und zeitlich hochaufgelösten Beobachtung und Simulation kleinräumig auftretender Extremereignisse. Auf Grundlage von anwendungsspezifischen Fernerkundungstechniken, moderner low-cost Sensorik und Geoinformationstechnologien werden neue Formen operationeller Monitoring-Systeme zur effizienten Verdichtung der vorhandenen Beobachtungsnetze untersucht. Gleichzeitig helfen historische Analysen und die prädiktive Modellierung kleinräumiger Extremereignisse dabei, eine Informationsgrundlage für Frühwarnsysteme und zukünftige Anpassungsstrategien aufzubauen.

Die Kernziele des Projektes sind eine verbesserte Vorhersagegüte und die Schaffung innovativer Auswertemöglichkeiten für hydro-meteorologischen Extremereignisse in kleinen und mittleren Einzugsgebieten. Dies soll insbesondere durch die Schaffung von Synergieeffekten zwischen den am Projekt beteiligten Disziplinen Meteorologie, Hydrologie, Photogrammetrie und Geoinformatik erreicht werden. Im Ergebnis steht die Bündelung einer Vielzahl in sich geschlossener Komponenten in einem Informationssystem. Über dieses können Informationen über die Entstehung, Prognose und Auswirkung hydro-meteorologischer Extremereignisse abgerufen und in Form von interaktiven Karten, Zeitreihen oder Textbausteinen dargestellt werden.

Anhand ausgewählter Pilot-Einzugsgebiete werden die entwickelten Komponenten prototypisch umgesetzt und unter realen Bedingungen getestet. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Harmonisierung von Prozessen und Abläufen, um eine spätere Transferierbarkeit auf weitere Einzugsgebiete zu ermöglichen.

1.1. Beschreibung der Einzugsgebiete

Für die Akquise und Auswertung historischer hydro-meteorologischer Daten, sowie das Monitoring relevanter hydro-meteorologischer Parameter im Laufe des Projektes wurden insgesamt drei Pilot-Einzugsgebiete ausgewählt (Abbildung 1).



Abbildung 1: Pilot-Einzugsgebiete

1.1.1. EZG Wernersbach

Das Einzugsgebiet des Wernersbaches liegt ca. 25 km südwestlich von Dresden im Tharandter Wald. Es ist 4,6 km² groß und erstreckt sich über Höhenlagen von 323 m ü. NN bis zu 424 m ü. NN. Das rein forstwirtschaftlich genutzte Gebiet gliedert sich in 5 Teileinzugsgebiete und entwässert über die Triebisch in die Elbe. Als Experimentaleinzugsgebiet der TU Dresden wird es seit 1968 intensiv bemessen und verfügt neben Niederschlags und Abflussmessungen über Messungen zur Bodenfeuchte, Quellschüttung und den Grundwasserstand. Das Ziel der Messungen im Wernersbachgebiet ist die Erfassung des Wasserhaushaltes, insbesondere die zeitliche Verteilung der unterschiedlichen Abflusskomponenten.

1.1.2. EZG Mandau

Das Einzugsgebiet der Mandau hat eine Größe von 256 km² und reicht vom Quellgebiet auf tschechischer Seite in 523 m Höhe bis zur Mündung in die Lausitzer Neiße auf einer Höhe von 228 m. Der Wasserstand und die Durchflussmenge der Mandau werden durch drei Pegel-Messstationen des Landeshochwasserzentrums erfasst. Diese Daten bilden eine solide Grundlage für die Verdichtung und Validierung des Messnetzes durch alternative Messmethoden, beispielsweise über photogrammetrische Messsysteme, low-cost Sensorik oder Crowdsourcing.

1.1.3. EZG Große Ohe

Das Quellgebiet der Großen Ohe (19,1 km²) im Flussgebiet Ilz-Donau erstreckt sich im Kernbereich des Nationalparks Bayerischer Wald über einen Höhenbereich von 770 bis 1435 m ü. NN. Seit 1978 findet ein intensives hydrologisches Monitoring mit hydrochemischen, isopenhydrologischen und bodenhydraulischen Ansätzen statt. In Verbindung mit langjährigen meteorologischen Beobachtungen stellt dies eine gute Basis für die Erforschung der Hochwassergenese in kleinen Mittelgebirgsgebieten dar. Durch einen Jahresniederschlag von 1390 mm sowie einem steilen Geländegefälle ist das Gebiet anfällig für die Bildung von Sturzfluten.

2. ARBEITSSTAND

Das EXTRUSO-Projekt befindet sich derzeit in der Konzeptions- und Entwicklungsphase. Der Schwerpunkt liegt dabei auf dem parallelen Aufbau einzelner Systemkomponenten mit Schwerpunkt auf der methodischen Entwicklung. Die Interaktion zwischen diesen Komponenten wird derzeit nur schematisch betrachtet und in der nächsten Projektphase ausgebaut. Dieses Vorgehen soll die Eigenständigkeit der einzelnen Systemkomponenten, eine wichtige Voraussetzung für die spätere Umsetzung in einem dienstbasierten Informationssystem, gewährleisten.

2.1. Komponenten

Die zentralen Arbeitsschritte und damit verbundenen Teilkomponenten des EXTRUSO-Projektes sind in Abbildung 2 dargestellt. Die wesentlichen, in Entwicklung befindlichen Komponenten sind rot umrandet und werden im Folgenden näher beschrieben.

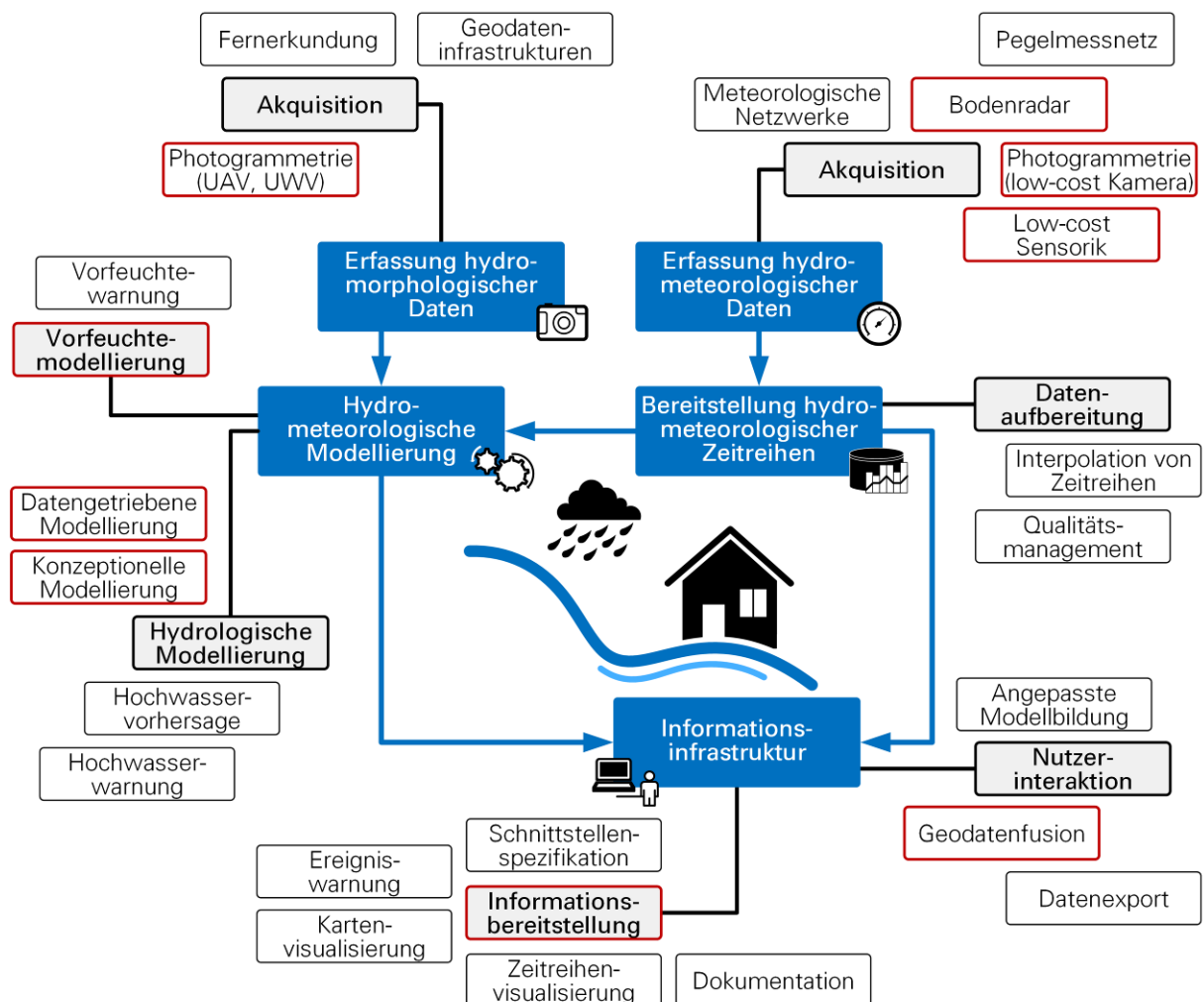


Abbildung 2: Zentrale Arbeitsschritte im EXTRUSO-Projekt

2.1.1. Niederschlagsmessung durch Analyse von Bodenradar-Daten

Die räumliche hochaufgelöste Verteilung und Menge von Niederschlägen sind für die Modellierung von Hochwasserereignissen und kurzfristige Wettervorhersagen von entscheidender Bedeutung. Eines der Ziele ist daher die Erstellung eines mehrstufigen statistischen Modells für die Kombination von Regenradarmessungen mit weiteren Niederschlagsbeobachtungen, etwa aus Regenmessstationen oder Messungen der Bodenfeuchte. Die Herausforderung liegt dabei auf der Kombination von Daten mit verschiedenen Fehlereinflüssen und raumzeitlichen Auflösungen. Um ein besseres Verständnis für die Verteilung von Starkregenereignissen zu erlangen, müssen dafür Niederschlagsinformationen aus dem Radolan RW-Produkt (stündliche Auflösung) mit Hilfe der Reflektivitätsdaten aus dem Radolan RX-Produkt (5-min Auflösung), Abbildung 3, disaggregiert werden. Dafür wurde ein Python-Skript entwickelt, welches unter Verwendung der Wradlib-Radar-Bibliothek¹ die Ableitung von Niederschlägen aus Radardaten ermöglicht.

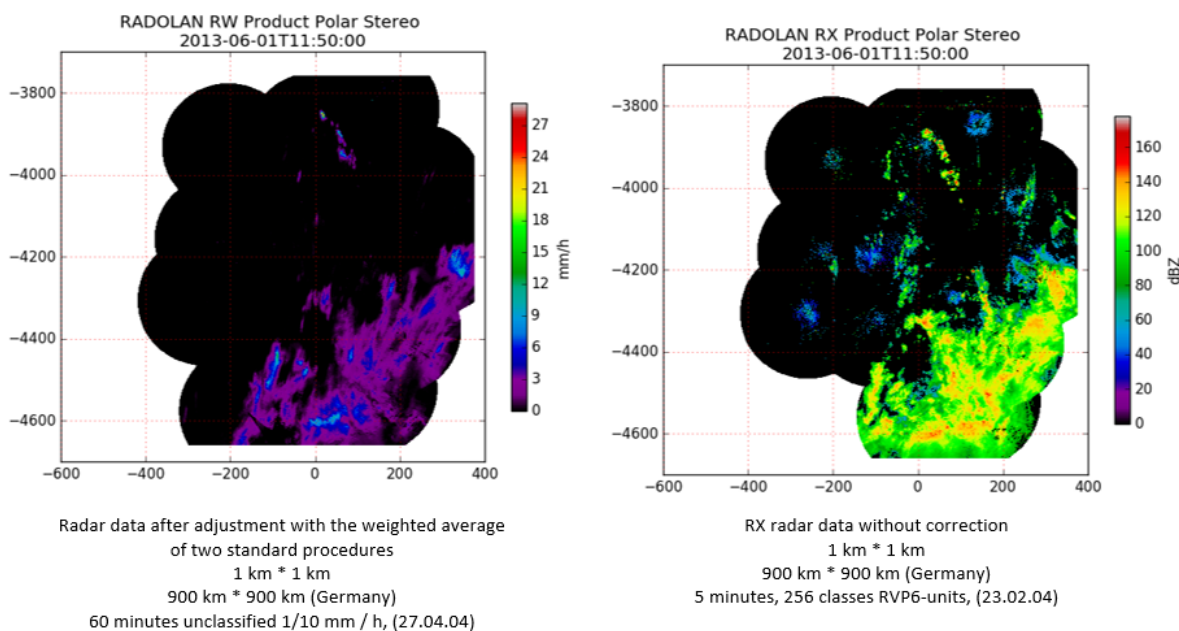


Abbildung 3: Vergleich von Radolan RW Produkt (links) und Radolan RX Produkt (rechts)

Der vom Deutschen Wetterdienst (DWD) bereitgestellten Niederschlagsraten für das Bundesgebiet basieren auf einer Komposition von 17 polarimetrischen X-Band-Radarstationen. Für die Disaggregation des Radolan RW-Produktes wurde der anteilige Prozentsatz der dazugehörigen Reflektivitäten aus dem Radolan RX-Produkt berechnet und entsprechend mit der Niederschlagsmenge aus dem RW-Produkt multipliziert, um ein äquivalentes RW-Produkt mit einer Auflösung von 5 min zu erhalten (Abbildung 4).

Da das Radolan RX-Produkt nicht durchgängig vorhanden ist, sondern Lücken aufweist, muss an diesen Stellen zunächst eine Interpolation vorgenommen werden. Einzelne Fehlstellen werden dabei linear interpoliert. Sobald mehrere Zeitschnitte nacheinander feh-

¹ <http://wradlib.org/wradlib-docs/latest>

len, wird das Radolan RW-Produkt für diese Stunde nicht disaggregiert, um zu hohe Fehlerraten zu vermeiden (Abbildung 5). Die Ergebnisse wurden für 23 Starkregenereignisse im Zeitraum von 2005 bis 2015 gerechnet und können auf das jeweilige Einzugsgebiet zugeschnitten werden.

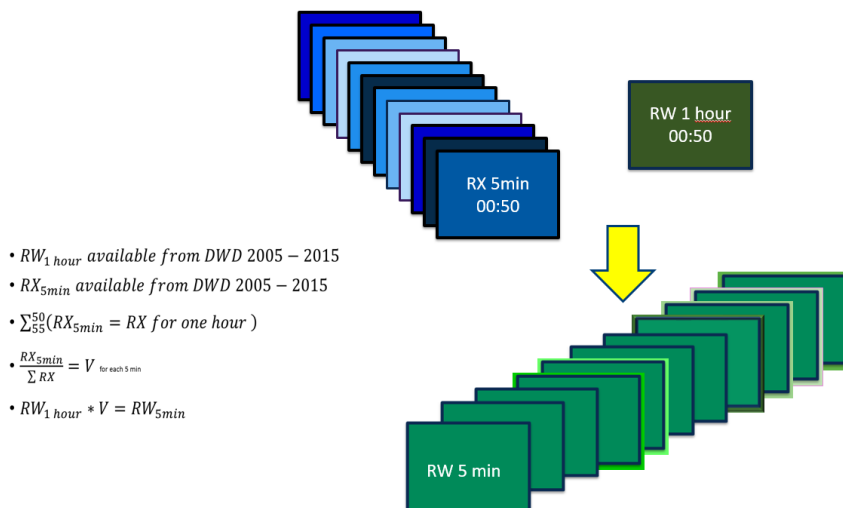


Abbildung 4: Disaggregation des Radolan RW-Produktes mit Hilfe des Radolan RX-Produktes

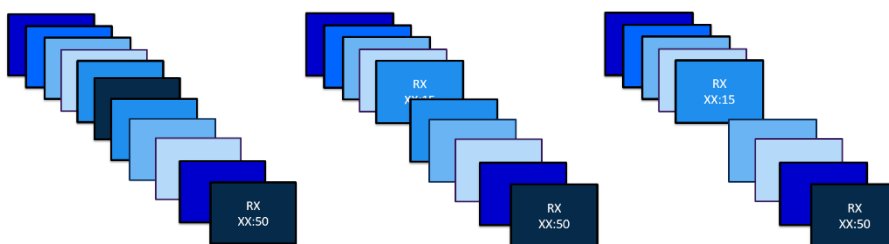


Abbildung 5: Struktur des Radolan RX-Produktes mit keinem fehlenden Wert (links), einer Fehlstelle (Mitte) und zwei Fehlstellen (rechts)

Neben den Bodenradardaten werden Niederschläge an getrennten Stellen am Boden an meteorologischen Stationen (Regenmessern) gesammelt. Diese können dazu genutzt werden, eine Reihe von Fehlern in den Radardaten zu analysieren und ggf. zu beseitigen. Diese ergeben sich unter anderem aus den Schwankungen des vertikalen Profils der Reflektivität und der Radarempfindlichkeit. Die routinemäßige Verifizierung der Niederschlagsschätzungen der Oberfläche wird größtenteils durch Vergleich mit Messungen eines Niederschlagsmessers über eine Reihe von Zeitpunkten durchgeführt, wodurch die Vorteile der Qualitätskontroll- und -korrekturprozesse quantifiziert werden konnten.

Mittels linearer Regressionsanalyse wurden im sächsischen Teilgebiet Wernersbach Rückstände zwischen acht Niederschlagsmessungen und entsprechenden radargeschätzten Regenfällen berechnet und anschließend mittels Residualregressionsanalyse mit der Entfernung von der Radarantenne untersucht. Ein multivariates Polynomregressionsmodell zweiter Ordnung wurde mit drei topographischen und lokalen Variablen als beste Prädiktoren entwickelt: Höhe, Entfernung und Breite, die einige der Varianzen der Restfehler erklären können. Dies bedeutet, dass Radarmessfehler nicht nur eine zufällige Variation

verursachen, sondern teilweise vorhergesagt werden können, was eine Art von Korrektur und Verbesserung der Genauigkeit des Radars ermöglicht.

Der Vergleich von Bodenradardaten und gemessenen Niederschlagswerten für drei verschiedene Regenmesser ist in Abbildung 6, Abbildung 7 und Abbildung 8 zu sehen. Dafür wurden jeweils die 25 Niederschlagsradarpixel um die Regenmesser herum ausgewählt, um zu sehen, welches Pixel dem Regenmesswert am ehesten entspricht. Die Boxplots zeigen die Niederschlagsabweichung (ohne Nullwerte). Das Radarpixel #13 liegt jeweils direkt über dem Regenmesser und zeigt eine gute Schätzung der Werte. Im weiteren Verlauf soll überprüft werden, ob eine systematische Beziehung zwischen der Position des Regenmessers und der Position des Radarpixels besteht.

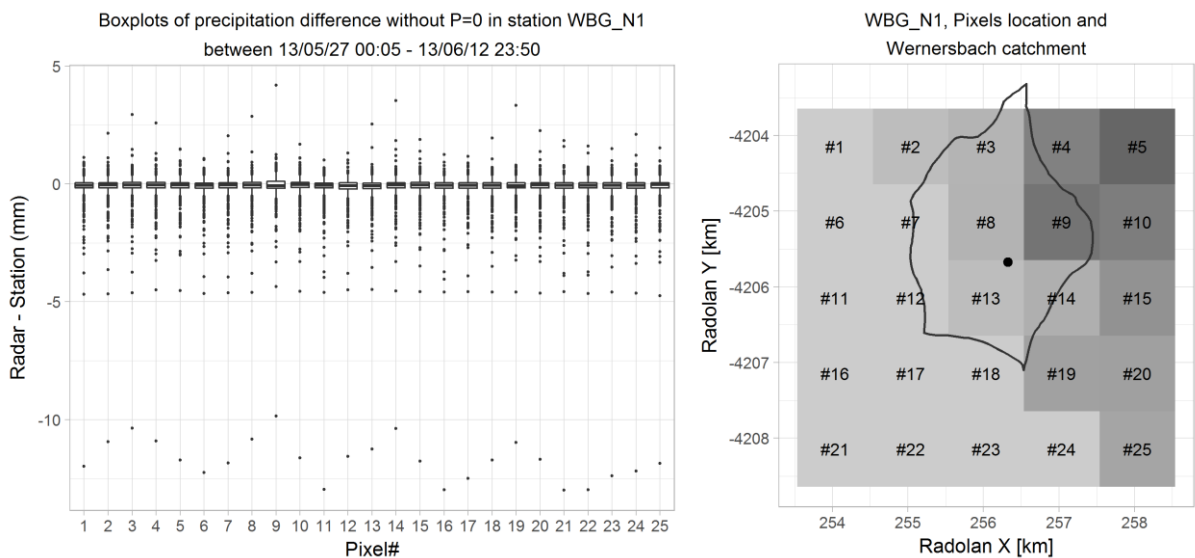


Abbildung 6: Vergleich von Regenradar- und Niederschlagsmessung an der Station WBG_N1 im Gebiet Wernersbach

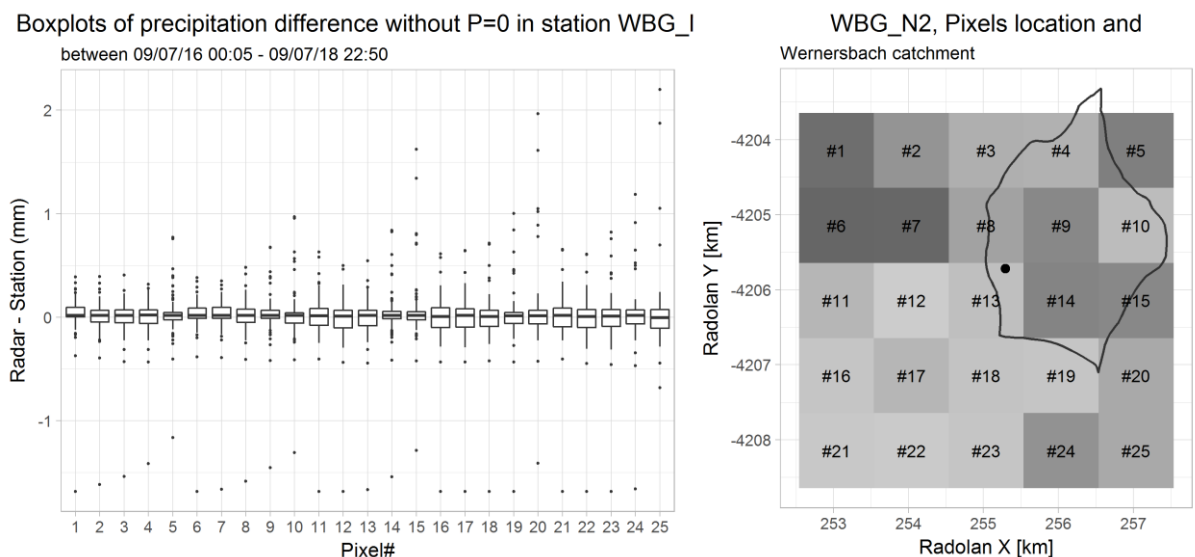


Abbildung 7: Vergleich von Regenradar- und Niederschlagsmessung an der Station WBG_N2 im Gebiet Wernersbach

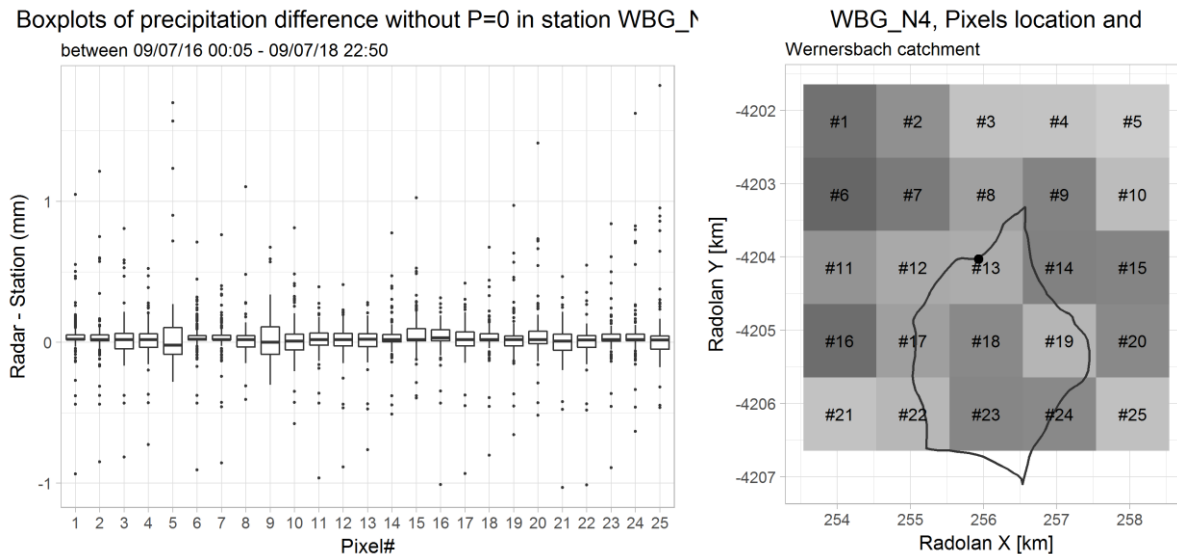


Abbildung 8: Vergleich von Regenradar- und Niederschlagsmessung an der Station WBG_N4 im Gebiet Wernersbach.

2.1.2. Photogrammetrische Akquisition hydro-meteorologischer Daten

Im Einzugsgebiet des Wernersbachs wurde ein kamera-basiertes low-cost System zur Erfassung des Wasserstands und potentiell der Fließgeschwindigkeit installiert. Das Monitoringsystem besteht aus drei Raspberry-Pi-Kameras, welche vor ihrer Installation kalibriert wurden, damit eine geometrisch genaue Messung möglich ist. Die Kameras befinden sich an einem Baum in unmittelbarer flussnähe zum Wernersbach-Tributär Triebenbach (Abbildung 9). Das System hat eine autarke Energieversorgung und löst einmal in der Stunde, synchronisiert via WLAN, aus. Somit können neben hydrometeorologischen Daten auch Flussquerschnitte stündlich aktualisiert und in der weiteren hydrologischen Modellierung verwendet werden.

Ein weiteres Kamerasystem befindet sich an der Wesenitz. Es besteht aus einer Kamera, die in einem beliebig kurzen Intervall auslösen kann, da sie an das Stromnetz angeschlossen ist. Der beobachtete Flussabschnitt wurde mit terrestrischem Laserscanning, UAV-Photogrammetrie und terrestrischen bildbasierten 3D-Rekonstruktionsmethoden erfasst, damit eine Reprojektion der im Bild gemessenen Informationen in den Objektraum als Voraussetzung für die Transformation der Bildmessung in eine Pegelbeobachtung möglich ist. Die Übertragung aller Messungen in ein Koordinatensystem geschieht hier über Passpunkte, die mit einem Tachymeter eingemessen wurden.

Stationäre terrestrische Kameras bieten bei entsprechenden Bildanalysemethoden und geeigneter Georeferenzierung die Möglichkeit, Gewässerstände mit einer hohen Genauigkeit zu bestimmen. Die hohe Variabilität von Fließgewässern schränkt jedoch die automatische Ableitung von Wasserständen aus terrestrischen Einzelbild-Aufnahmen stark ein. Abhilfe kann eine Ausdehnung der Analyse der Bildtextur auf die Zeitachse schaffen. Ko-registrierte Zeitraffersequenzen beschreiben den mittleren Wasserstand in Abhängigkeit des Beobachtungszeitraums und liefern zusätzlich temporale Texturmaße. Mittels Segmentierung von dynamischen (Wasser) und statischen (Land) Bereichen auf Basis der Raum-Zeit-Textur lässt sich die Wasserlinie extrahieren (Abbildung 10 oben). Wenn die

temporale Textur zu schwach ausgeprägt ist, wird in diesem Fall die Wasserlinie mittels eines Kantenoperators extrahiert (Abbildung 10 unten), welcher jedoch auch Wellen erkennt und somit rauschanfälliger ist.

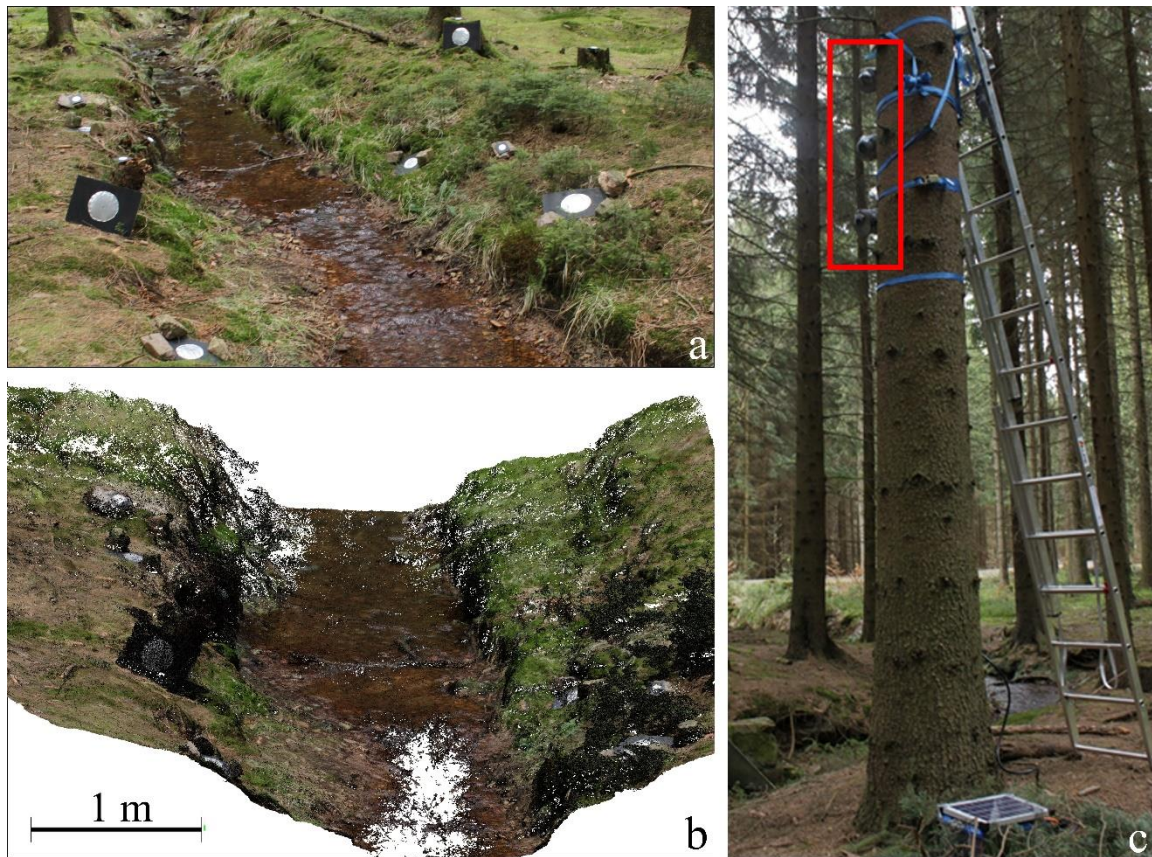


Abbildung 9: Low-cost Kamerasystem im Einzugsgebiet Wernersbach: a) beobachteter Kameraausschnitt; b) rekonstruiertes Geländemodell mittels terrestrischem SfM; c) drei Raspberry-Pi Kameras zur Triebenbachbeobachtung

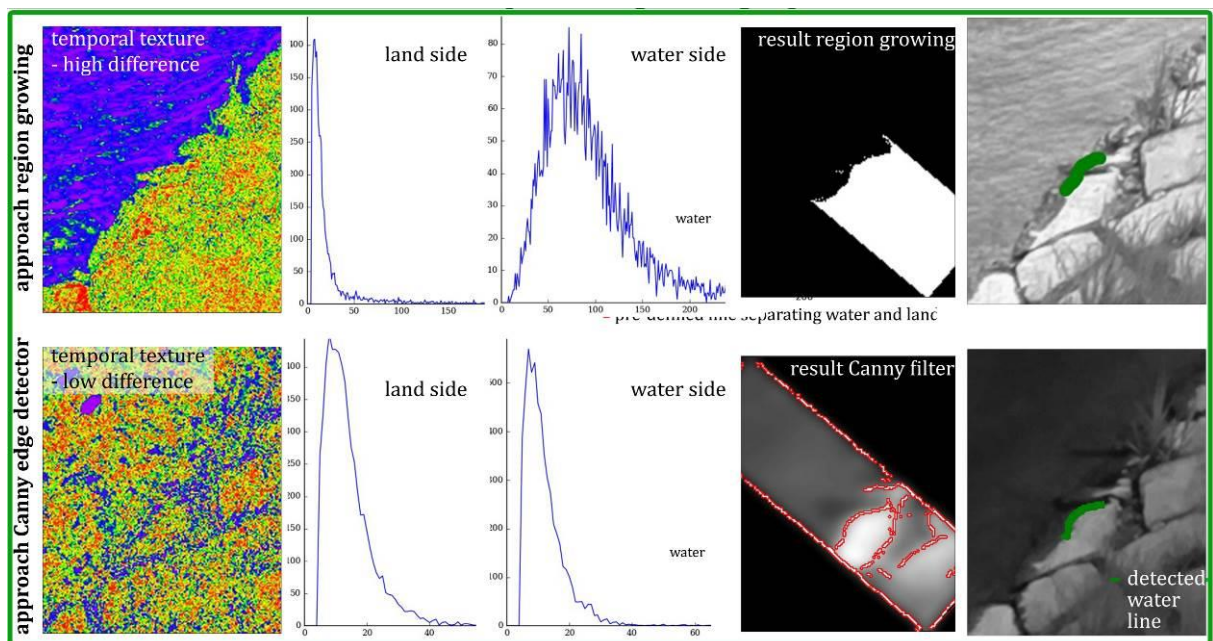


Abbildung 10: Automatisierte Wasserlinienextraktion mittels temporaler Textur (o.) oder Kantenoperator (u.)

Die Transformation der Bildmessung in den Objektraum erfolgt unter Nutzung des photogrammetrisch erstellten 3D-Modells des beobachteten Gewässerabschnittes. Bei entsprechender Aufnahmekonfiguration ist eine Genauigkeit der Pegelmessung im Bereich von wenigen cm zu realisierbar, welche durch Ergebnisse an der Wesenitz für einen Beobachtungszeitraum von 6 Wochen verifiziert werden konnte (Abbildung 11a).

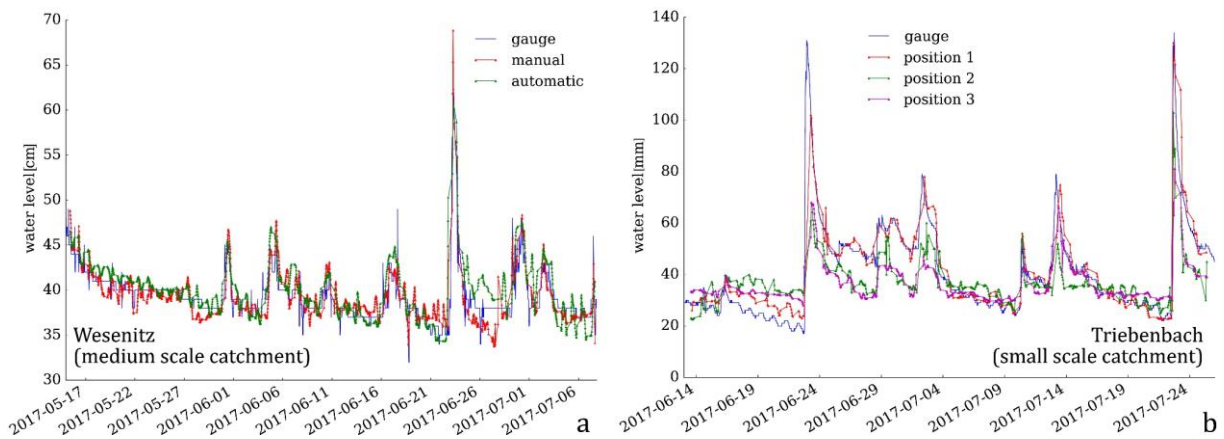


Abbildung 11: Wasserstände an der Wesenitz (a) und dem Triebenbach (b) bild-basiert ermittelt.

Messungen am wesentlich kleinerem Gewässer Triebenbach zeigen die Grenzen der automatisierten Wasserstandserkennung auf. Aufgrund fehlender Wellenbewegung bei gleichzeitig starker Texturierung des Unterwasserbereichs ist es nicht möglich mit der temporalen Textur oder einem Kantenoperator zu arbeiten. Daher wurde in diesem Fall die Wasserstandsbestimmung manuell vorgenommen, in dem in den Bildern die Wasserlinie mit einem Punkt markiert wurde. Die Ergebnisse zeigen Wasserstandsmessungen mit einer Genauigkeit im mm-Bereich (Abbildung 11b).

2.1.3. Akquisition hydro-meteorologischer Daten durch low-cost Sensorik

Im Rahmen des EXTRUSO-Projektes werden verschiedene low-cost-Sensoren mit dem Ziel der Bestimmung von Niederschlägen eingesetzt und analysiert. Dazu gehörten neben Pegelsensoren und Kippwaagen auch Mikrofone, Feuchtigkeitssensoren und Ultraschallsensoren, die den Niederschlag indirekt bestimmen können. Erste Tests im Vorlauf des Projektes wurden mit Hilfe eines Regentestfeldes der Professur für Hydrologie realisiert. Die Auswertung zeigte, dass es signifikante Unterschiede zwischen den verschiedenen getesteten Systemen gibt. Am erfolgversprechendsten scheint dabei die Verwendung von Kippwaagen. Daher wurden von diesem Sensortyp verschiedene Produkte aus dem low-cost Bereich beschafft, wobei sich der Regensensor der Firma Davis als am nützlichsten herausstellte.

Für die Erfassung von räumlich hochaufgelösten Niederschlagsdaten wurden zwei verschiedene Messsysteme (Typ RPi / Typ Arduino) konzipiert. Diese können je nach Voraussetzungen am Aufstellort ausgewählt und eingesetzt werden. Grundsätzlich setzen sich die Messstationen aus einer Sensorkomponente, einer Komponente zur Aufzeichnung und Übertragung der Messwerte, sowie einer Komponente zur Stromversorgung zusammen.

Das Kernstück der Stationen vom Typ RPi bilden Raspberry Pi Einplatinen-Computer. Diese bieten die Möglichkeit verschiedene Sensortypen anzusteuern und deren Messwerte aufzuzeichnen und zu verarbeiten. Weiterhin ist durch die relativ hohe Rechenleistung eine Kombination mit anderen Sensoren, z.B. einer photogrammetrischen Pegelmessstation, auf einer Steuerungseinheit möglich. Der Nachteil des verwendeten Einplatinen-Computers ist jedoch der relativ hohe Stromverbrauch (2 Watt), welche die Nutzung eines großen Solarpanels sowie einer großen Pufferbatterie erfordert und so die Kosten der Station deutlich erhöht (Kostenanteil Stromversorgung 50%). Der Einsatz dieser Station ist daher vordergründig dort denkbar, wo entweder eine Stromversorgung über das Stromnetz gegeben ist, oder aber die Nutzung als Pegelstation den Einsatz dieses Typs erfordert (dann mit Solarpanel und Pufferbatterie). Die Datenübertragung der Messwerte wird bei den Stationen dieses Typs mit GSM-Funkmodulen realisiert. Auch dies führt zu Einschränkungen in der Nutzbarkeit, da in ländlichen Gebieten zum Teil keine ausreichende Netzabdeckung gegeben ist.



Abbildung 12: Low-cost Kippwaage (Davis) zur Messung von Niederschlagsmengen: Messkegel (links), Kippwaage (rechts oben); Regensensoren zur Kalibrierung im Messfeld (rechts unten).

Aus den genannten Einschränkungen ergab sich die Notwendigkeit für die Entwicklung eines weiteren Messsystems, welches auch autark im Feld betrieben werden kann. Bei diesem System vom Typ Arduino kommen Arduino MKR FOX 1200 Mikrokontroller zum Einsatz. Diese zeichnen sich durch eine extrem niedrige Leistungsaufnahme aus, verfügen im Gegensatz zum Raspberry Pi aber auch nur über eine niedrige Rechenleistung. Die

Stationen dieses Typs sind daher auf die Erfassung von Niederschlagsdaten (oder ähnlichen Umweltdaten – Temperatur, Luftdruck, Luftfeuchte) beschränkt. Die Stationen können mit handelsüblichen AA-Batterien für mehrere Monate betrieben werden, was die Nutzung eines teuren Solarpanels überflüssig macht. Die Datenübertragung wird hier über das Sigfox Netzwerk (ein für das IOT entworfenes Schmalbandnetzwerk) realisiert, für das die Übertragungstechnik direkt auf dem Arduino MKR FOX 1200 Board integriert ist. Die Verfügbarkeit des Netzes ist laut Informationen des Betreibers auch in ländlichen Gebieten (Sachsens) gegeben, muss im Einzelfall aber am Aufstellort geprüft werden.

Sensor	Davis Sensor Werkskalibrierung (0.2mm/Kipp.)	Davis Sensor Kalibriert an Mittelwert (0.22mm/Kipp.)	Young Waage	Ott Pluvio	TRwS 200
Preis	ca. 65€		ca. 600€	ca. 8000€	ca. 3000€
Messprinzip	Kippwaage	Kippwaage	Kippwaage	Wägung	Wägung
Summe Niederschl. Abweichung Mittel	185,4 mm - 9,33%	203,94 mm - 0,26%	201,9 mm - 1,26%	205,0 mm + 0,26%	206,5 mm + 0,99%
Pearson Korrelation mit Ott Pluvio	0,99981	0,99981	0,99988	1	0,99999

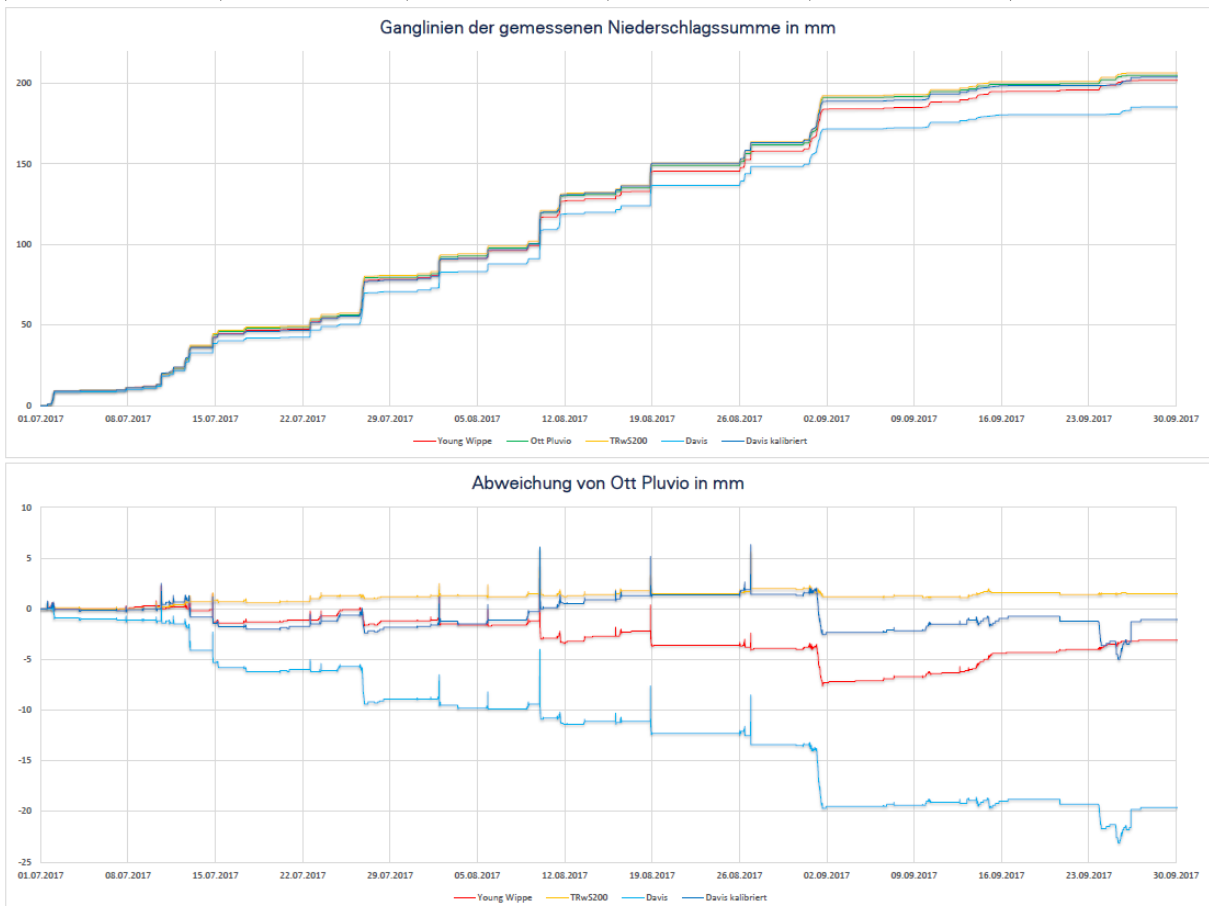


Abbildung 13: Ergebnisse – Niederschlagsmessung mit Low-Cost Sensor

Durchführung einer Langzeitvergleichsmessung mit drei professionellen Niederschlagssensoren (Young-Wippe, Ott-Pluvio, TRwS200) im Zeitraum Juli – September 2017

Ein Prototyp einer Regenmessstation (Typ RPi) wurde zur Langzeitkalibrierung auf dem meteorologischen Testfeld der TU Dresden in Tharandt installiert (Abbildung 12). Im An-

schluss an die Messperiode (07/17-09/17) konnte die Station an die professionellen Geräte ankalibriert werden. Es konnte gezeigt werden, dass der Low-Cost Sensor aufgrund der geringen Messabweichungen von den professionellen Geräten zur Verdichtung von Messnetzen geeignet ist (Abbildung 13). Diese Station ist weiterhin in Betrieb. Eine Bewertung der Langzeitstabilität des Sensors steht noch aus, und wird für das Ende der Regensaison 2018 angestrebt. Zusätzlich wurden auf dem Testfeld durch Teilnehmer eines studentischen Seminars, mehrere Regensensoren für einen Zeitraum von drei Monaten (ebenfalls 07/17-09/17) eingesetzt. Diese Messungen soll im Rahmen des Seminars im Sommer 2018 wiederholt, und Aufschluss über die Streuung der Vorkalibrierung der Sensoren geben. Außerdem soll im Rahmen des Seminars die Datenübertragung via SigFox getestet werden (Studenten als Crowdsourcing-Teilnehmer). Die Übertragung der low-cost Messungen in das Informationssystem soll über die OpenSensorWeb Plattform realisiert werden.

2.1.4. Photogrammetrische Akquisition hydro-morphologischer Daten

Für die Generierung von Geländemodellen kleiner Einzugsgebiete werden multisensorale Messplattformen zur Datenerfassung aus der Luft (unmanned aerial vehicle, UAV) und vom Wasser (unmanned water vehicle, UWV) eingesetzt.

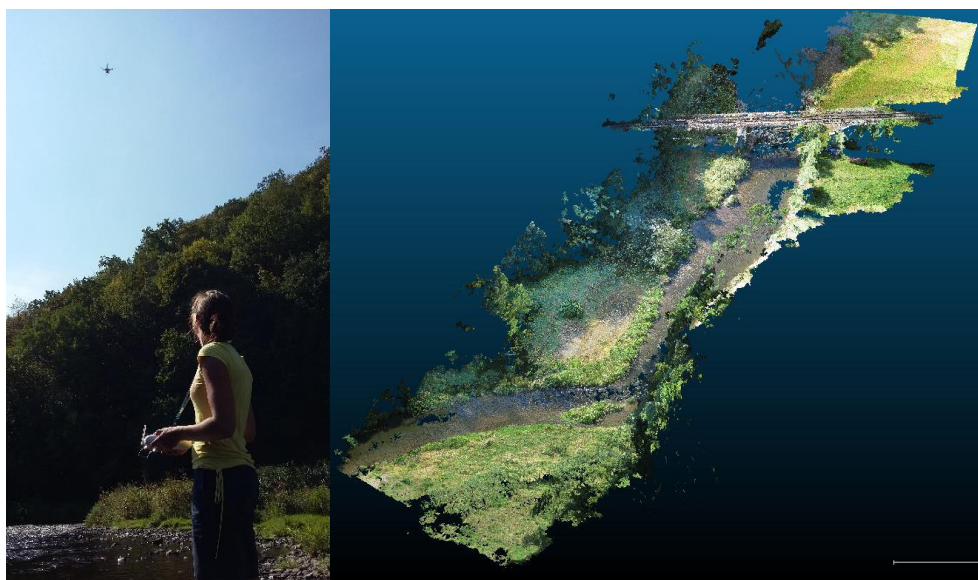


Abbildung 14: Geländeaufnahme mit einem UAV: Befliegung an der Freiburger Mulde (links); mit SfM generierte 3D-Punktwolke (rechts).

Die Messung mittels UAV erfolgt mit einer nach unten ausgerichteten Kamera. Aus den aufgenommenen Bildsequenzen wird mit dem Verfahren Structure-from-Motion (SfM) ein Geländemodell zur Beschreibung der Flussmorphologie berechnet (Mader et al. 2015). Ergebnisse an der Freiburger Mulde und an der Wesenitz zeigen, dass der Flusslauf und angrenzende Auenbereich mit dem Verfahren digitalisiert werden können (Abbildung 14). Bisher wurde nur ein Teilgebiet vermessen, allerdings kann mit längeren Befliegungs- und Auswertezeiten das Verfahren auch auf komplette Teil-Einzugsgebiete erweitert werden. Probleme bei der Aufnahme aus der Luft ergeben sich, wenn das Einzugsgebiet stark be-

waldet und daher schlecht zu befliegen und einzusehen ist. Eine mögliche Lösung im weiteren Verlauf des Projekts kann dabei die Ausstattung des UAVs mit einem Laserscanner darstellen. Durch eine Befliegung oberhalb der Bäume kann simultan ein digitales Gelände- und Kronenmodell generiert werden.

Das UUV wird mit einer 360°-Kamera, einem Laserscanner für die Abtastung der Ufer und mit einem Laser-Kamera-System für die Messung der Wassertiefe sowie der Beschaffenheit des Gewässerbodens ausgestattet. Die Bilder der Kamera konnten bei ersten Testläufen mit einem manuell gezogenen Floß auf der Weißeritz und der Freiburger Mulde bereits zur Generierung einer kolorierten 3D-Punktwolke der Ufer über SfM verwendet werden (Abbildung 15). Aus der Abtastung mit dem Laserscanner soll ebenfalls eine 3D Punktwolke des Ufers berechnet werden. Der Laserscanner nimmt Linienprofile auf, welche durch eine Bewegung des Boots entlang des Flusses zu einer kompletten Digitalisierung der Ufer addiert werden. Dazu muss die Position und Ausrichtung des Boots zu jedem Zeitpunkt hochgenau bekannt sein. Da die Positionsbestimmung mit dem Floß noch nicht gelöst wurde, konnten bisher keine Daten mit dem Laserscanner generiert werden.

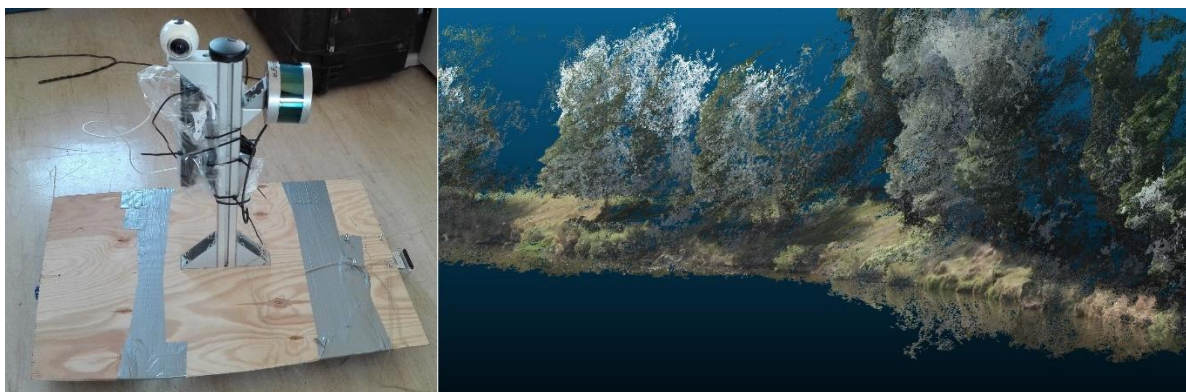


Abbildung 15: Uferaufnahme mit einem UUV: Prototyp mit Laserscanner und 360°-Kamera (links); mit SfM generierte 3D-Punktwolke des Ufers (rechts)

Nach der erfolgreichen Durchführung der Testmessungen mit dem Floß wurde das System auf eine fernsteuerbare Boot-Plattform übertragen. Eine erste Testfahrt auf dem Heidemühlenteich bei Dippoldiswalde wurde erfolgreich absolviert. Dabei wurde wie zuvor aus Aufnahmen mit der 360°-Kamera ein 3D-Modell berechnet (Abbildung 16).



Abbildung 16: Uferaufnahme mit dem UUV: Ferngesteuertes Messboot am Heidemühlenteich (links); mit SfM generierte 3D-Punktwolke des Ufers (rechts)

Im aktuellen Arbeitsschritt wird das UWV mit weiterer Sensorik ausgestattet. Dazu zählen neben der Aufnahmesensorik über Wasser (360°-Kamera; Laserscanner) und unter Wasser (Unterwasserkamera und Linienlaser; Echolot) auch ein Positionierungssystem. Die IMU (Inertiale Messeinheit) mit integriertem GPS-Sensor misst Position und Neigung des UWV. Weitere Tests sollen die Erfassung des Ufers mittels Laserscanner sowie die Nutzung des Echolots für die Messung der Gewässertiefe umfassen. Zudem sollen die mittels UAV und UWV generierten Oberflächenmodelle zu einem, hochaufgelösten Oberflächenmodell fusioniert werden. Dabei kann die große Abdeckung des Einzugsgebiets aus der Luft mit hochaufgelösten Daten des Ufers und des Flussbetts vom Boot ergänzt werden.

In Abbildung 17 ist das UWV mit integrierter Sensorik abgebildet. Die optischen Sensoren (360°-Kamera und Laserscanner) werden für die Abtastung der Ufer eingesetzt, während das Echolot die Gewässertiefe misst. Die Sensoren werden von einem Raspberry-Pi Einplatinenrechner angesteuert, der auch die Daten aufzeichnet, welche anschließend im Büro prozessiert und ausgewertet werden. Um eine Fusion der Messdaten der verschiedenen Sensoren zu ermöglichen, müssen diese in einem gemeinsamen Koordinatensystem vorliegen. Dafür wurde ein an der Professur für Photogrammetrie entwickeltes Kalibrierverfahren angepasst. Durch die simultane Aufnahme eines speziellen Kalibrierfelds mit beiden Sensoren kann die Position und Orientierung der Sensoren in einem gemeinsamen Koordinatensystem bestimmt werden (Sardemann et al. 2018). Um die Messdaten von diesem UWV-basierten Koordinatensystem in ein übergeordnetes Welt-Koordinatensystem zu georeferenzieren, muss außerdem die relative Orientierung zwischen der Positionierungseinheit und den Sensoren kalibriert werden. Diese wird bisher durch die Annahme angenähert, dass die Positionierungseinheit und der Laserscanner rechtwinklig zueinander montiert sind. Um die Genauigkeit der Messungen zu verbessern, wird die relative Lage und Orientierung der Positionierungseinheit im weiteren Verlauf des Projekts in das Kalibrierverfahren integriert.

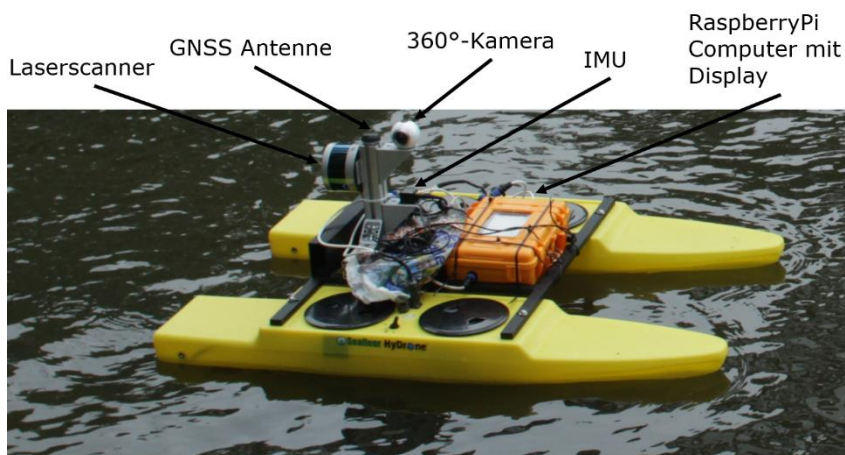


Abbildung 17: Unbemanntes Wasserfahrzeug als Multisensorplattform mit Laserscanner, 360°-Kamera, Echolot, GPS-gestützter IMU und RaspberryPi Computer.

Mit den kalibrierten Sensoren konnte das UWV für erste Messkampagnen zur Validierung des Messprinzips eingesetzt werden. An der Freiburger Mulde wurde ein 1,5 km langer Abschnitt befahren. Abbildung 18 zeigt einen Ausschnitt der mit dem Laserscanner aufgenommenen Punktwolke der Ufer. Abbildung 19 zeigt die fusionierte Punktwolke aus

Laserscanner-Abtastung der Ufer, interpolierter Echolotmessung der Gewässertiefe und UAV-basierter SfM Punktwolke des angrenzenden Teileinzugsgebiets. Weitere Messdaten wurden an der Wesenitz auf Höhe des Pegel Elbersdorf und an der Maschinenfabrik Stolpen aufgenommen und werden aktuell prozessiert.

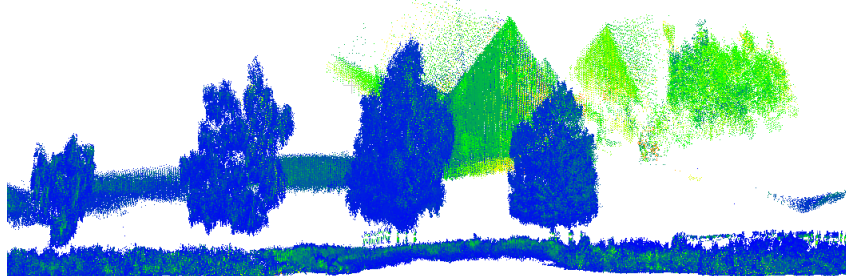


Abbildung 18: Intensitätskodierter Ausschnitt der Laserscanner-Punktwolke.

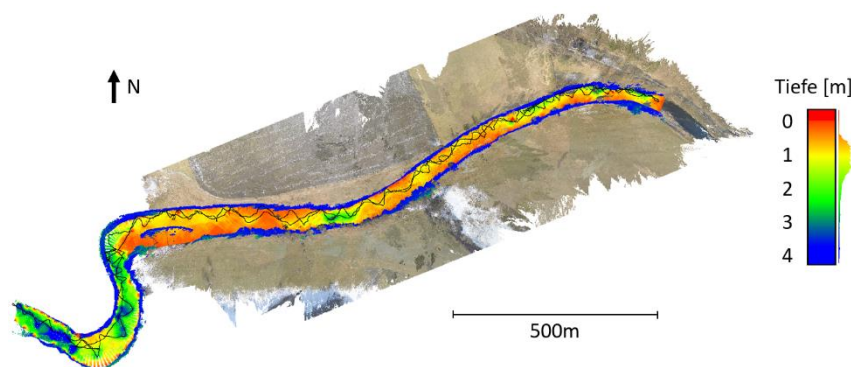


Abbildung 19: Ergebnisse einer Messfahrt auf der Freiburger Mulde. Die Punktwolke des Laserscanners ist blau dargestellt. Die schwarze Linie zeigt die Route des UJV in einer Zick-Zack Befahrung auf Hin- und Rückweg. Die interpolierten Echolotmessungen sind tiefenkodiert dargestellt. Die angrenzenden Uferbereiche wurden mit SfM aus UAV-Aufnahmen generiert.

2.1.5. Vorfeuchtemodellierung

Einen wichtigen Beitrag zur historischen, wie auch aktuellen Beurteilung des Gebietszustands und des Hochwasserrisikos in den betrachteten Einzugsgebieten soll die Modellierung der Bodenfeuchte liefern. Die Bodenfeuchte wird bei diesem Ansatz als Indikator für das noch vorhandene Speichervolumen von neu infiltrierendem Wasser genutzt. Ist die Bodenfeuchte hoch, also das bodenspezifische Porenvolumen stark gefüllt, wäre bei einem Regenereignis nicht genügend Rückhaltevolumen vorhanden um das neu infiltrierende Wasser aufzunehmen. Die Folge ist die Bildung von direktem Oberflächenabfluss, der die Grundlage für Flash Floods bildet. Die Modellierung der Bodenfeuchte erfolgt durch zwei Modelle, um einerseits die mittlere Bodenfeuchte im Gebiet und andererseits eine räumlich differenzierte Verteilung dieser Bodenfeuchte untersuchen zu können. Die Modelle werden mittels PEST Software (Model-independent Parameter Estimation & Uncertainty Analysis) kalibriert. Die Zielgrößen für die Validierung sind zum einen die Evapotranspiration, welche aus Eddykovarianz-Methode über typischen Landnutzungen im

Osterzgebirge bestimmt wurden, sowie Bodenfeuchtemessungen von den angrenzenden Messstationen.

Für den Ansatz einer Vorfeuchte-basierten Hochwasserwarnung, einer sogenannten Flash Flood Guidance, werden Modelle parametrisiert, die die Bodenfeuchte sehr schnell modellieren können. Flash Flood Guidance ist ein diagnostisches Werkzeug zur schnellen Flash Flood Diagnose und zur Kurzzeitvorhersagen deren Auftretens. Dabei erfolgt eine Berücksichtigung von bis zu minutengenauen Niederschlagsinformationen. Die Vorteile dieses Ansatzes sind der Einsatz für sehr große Gebiete mit Flash Flood Potential und der sehr geringe Einsatz von Rechner-Ressourcen.

Das derzeit verwendete Modell BROOK90 (Federer 2002) ist ein eindimensionales, physikalisches Netzwerkmodell für kleine, gleichförmige Einzugsgebiete. Es wird häufig im Kontext hydrologischer Simulationen in bewaldeten Gebieten eingesetzt, kann aber auch auf andere Landbedeckungsarten und jahreszeitliche Änderungen angepasst werden. Das Modell kann über eine Vielzahl von Parametern, u.a. zur Charakterisierung von Vegetation, Boden und Fließverhalten, gesteuert werden. Die Standard-Parametrisierung muss entsprechend auf die Charakteristiken des zu betrachtenden Einzugsgebietes angepasst und kalibriert werden. Das Verhältnis zwischen der hydraulischen Leitfähigkeit, dem Bodenwassergehalt und dem Wasserpotential zur Beschreibung der Wasserbewegung basieren auf einem modifizierten Modellansatz von (Clapp and Hornberger 1978). Ein Nachteil ist die fehlende horizontale Diskretisierung der einzelnen Parameter, wodurch die Modellierung von Einzugsgebieten mit starkem Gefälle erschwert wird.

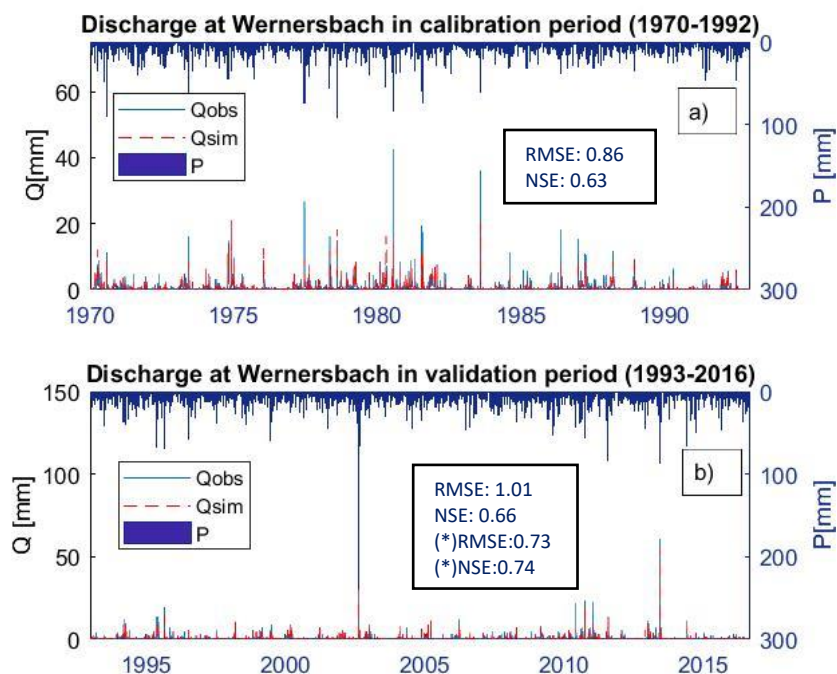


Abbildung 20: Beobachteter und simulierter Durchfluss am Wernersbach in a) der Kalibrierungsperiode und b) der Validierungsperiode

Die Modellierung der Vorfeuchte wurde zunächst im Einzugsgebiet Wernersbach umgesetzt. Da die Korrelation zwischen Bodenfeuchte und Starkregen stark von der Landbedeckung und Bodencharakteristiken abhängt, liegt der Schwerpunkt der Modellierung auf der entsprechenden Veränderung dieser Eigenschaften, z.B. durch historische Hochwasserereignisse oder Schädlingsbefall. Erste Modellergebnisse für die Abflusssimulation am Wernersbach sind in Abbildung 20 dargestellt. Die Übereinstimmung des NSE (Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient) in beiden Messperioden spricht für die Anwendbarkeit des Modells in diesem Untersuchungsgebiet. Allerdings wurden Abflussspitzen unterschätzt, wodurch ein relativ hoher quadratischer mittlerer Fehler (RMSE) zustande kommt.

Die Modellierung anhand ausgewählter Jahre (Abbildung 21) zeigt, dass der simulierte Bodenwassergehalt eine direkte Verbindung zum Niederschlag aufweist. Die Annahme, dass der höchste Abfluss nach Starkregenereignissen stattfindet konnte allerdings nicht bestätigt werden. Stattdessen treten die höchsten Abflüsse auf, wenn der Boden bereits eine hohe Vorfeuchte besitzt, unabhängig von der Stärke des Niederschlages. Die Ergebnisse aus dem BROOK90 Modell können entsprechend genutzt werden, um eine kritische Vorfeuchte für ein Einzugsgebiet zu bestimmen.

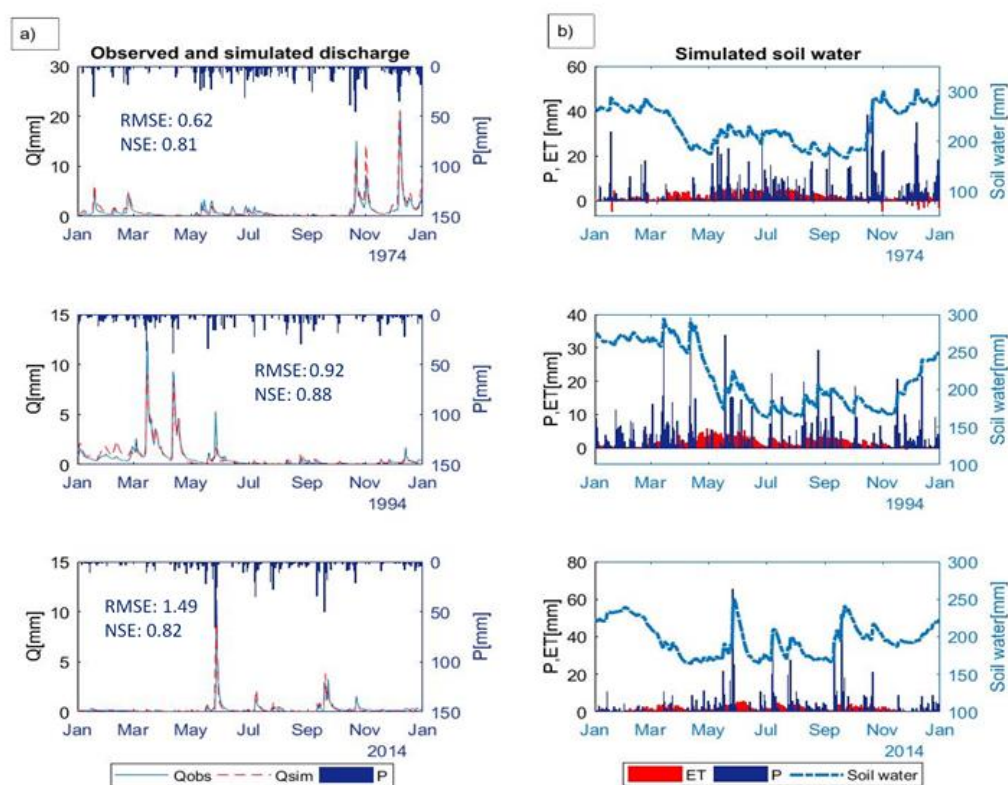


Abbildung 21: Zusammenhang zwischen Niederschlag (P), Abfluss (Q), Bodenwassergehalt (Soil water) und Evapotranspiration (ET)

Um den Transfer des BROOK90 Modells auf unbeobachtete Einzugsgebiete und kürzere Messperioden zu ermöglichen, wurden vier verschiedene Modellstrukturen mit jeweils

drei unterschiedlichen Parametersätzen getestet. Die Modellstrukturen unterscheiden sich im Wesentlichen durch die Beschreibung des Infiltrationsprozesses (Abbildung 22):

- M1: klassische top-down Infiltration des gesamten Wassers
- M2: Infiltration über Makroporen
- M3: Infiltration über Makroporen und variabler Oberflächenabfluss undurchlässiger Flächen
- M4: Kalibrierung des Abflusses durch PEST

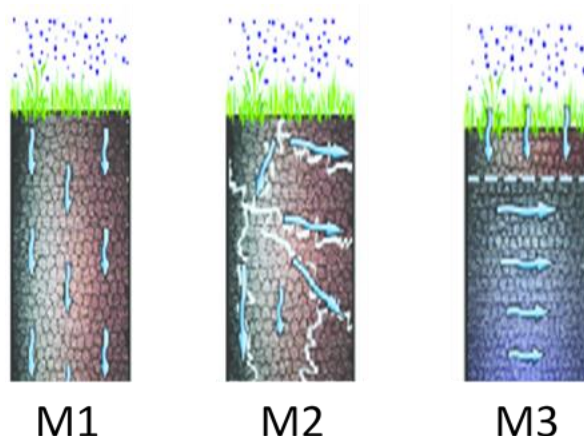


Abbildung 22: Im Modell abgebildete Infiltrationsprozesse (nach Rinderer and Seibert 2012)

Die Parametersätze (Szenarios) unterschieden sich dahingegen durch die Anzahl von Eingangsmesswerten, die für die Modellierung zur Verfügung stehen:

- D1: Niederschlag, min/max. Tagestemperatur
- D2: Abfluss und Globalstrahlung fehlen
- D3: alle benötigten Inputdaten

Der Vergleich der verschiedenen Modellkonfigurationen ist in Tabelle 1 aufgeführt. Erwartungsgemäß liegen die Ergebnisse für den Kalibrierungszeitraum über denen im Validierungszeitraum. Das gleiche gilt für die abnehmende Genauigkeit mit abnehmender Anzahl von Eingangsmesswerten, wobei das Szenario D1 deutlich hinter den Szenarien D2 und D3 liegt. Insgesamt liefert dabei das kalibrierte Modell (M4) die besten Ergebnisse.

Tabelle 1: Evaluierung der definierten BROOK90 Modellkonfigurationen und Szenarien

Modell- struktur	Szenario	Validierungszeitraum			Kalibrierungszeitraum		
		RB (%)	NSE	KGE	RB (%)	NSE	KGE
M4	D3	5.6	0.71	0.77	12	0.84	0.85
	D2	-7.4	0.67	0.69	3.5	0.83	0.86
	D1	-28.4	0.61	0.50	-9	0.82	0.79
M3	D3	8.3	0.41	0.67	11.1	0.74	0.83
	D2	-8.7	0.36	0.59	-0.3	0.74	0.87
	D1	-34.8	0.27	0.34	-15.3	0.73	0.77

M2	D3	10.8	0.4	0.67	14	0.48	0.67
	D2	-5.8	0.42	0.64	3	0.5	0.74
	D1	-31.2	0.4	0.44	-11.8	0.56	0.75
M1	D3	3.4	0.3	0.63	4.4	0.7	0.85
	D2	-14.7	0.25	0.53	-8.7	0.69	0.81
	D1	-42.2	0.17	0.25	-24	0.69	0.69

Die Validierung der Bodenfeuchte mit gemessenen Werten in verschiedenen Tiefen (Abbildung 23) zeigt eine hohe Korrelation in der oberen Bodenschicht (0-30cm). Die Bodenfeuchte in der untersten Bodenschicht (100cm) wird dahingegen nur unzureichend abgebildet. Es wird jedoch angenommen, dass die Bodenfeuchte in den oberen Bodenschichten für die Entstehung von Sturzfluten der maßgebliche Faktor ist. Die guten Ergebnisse der nicht-kalibrierten Modellkonfigurationen M2 und M3 zeigt das Potential des Modells für den Einsatz in unbeobachteten Einzugsgebieten.

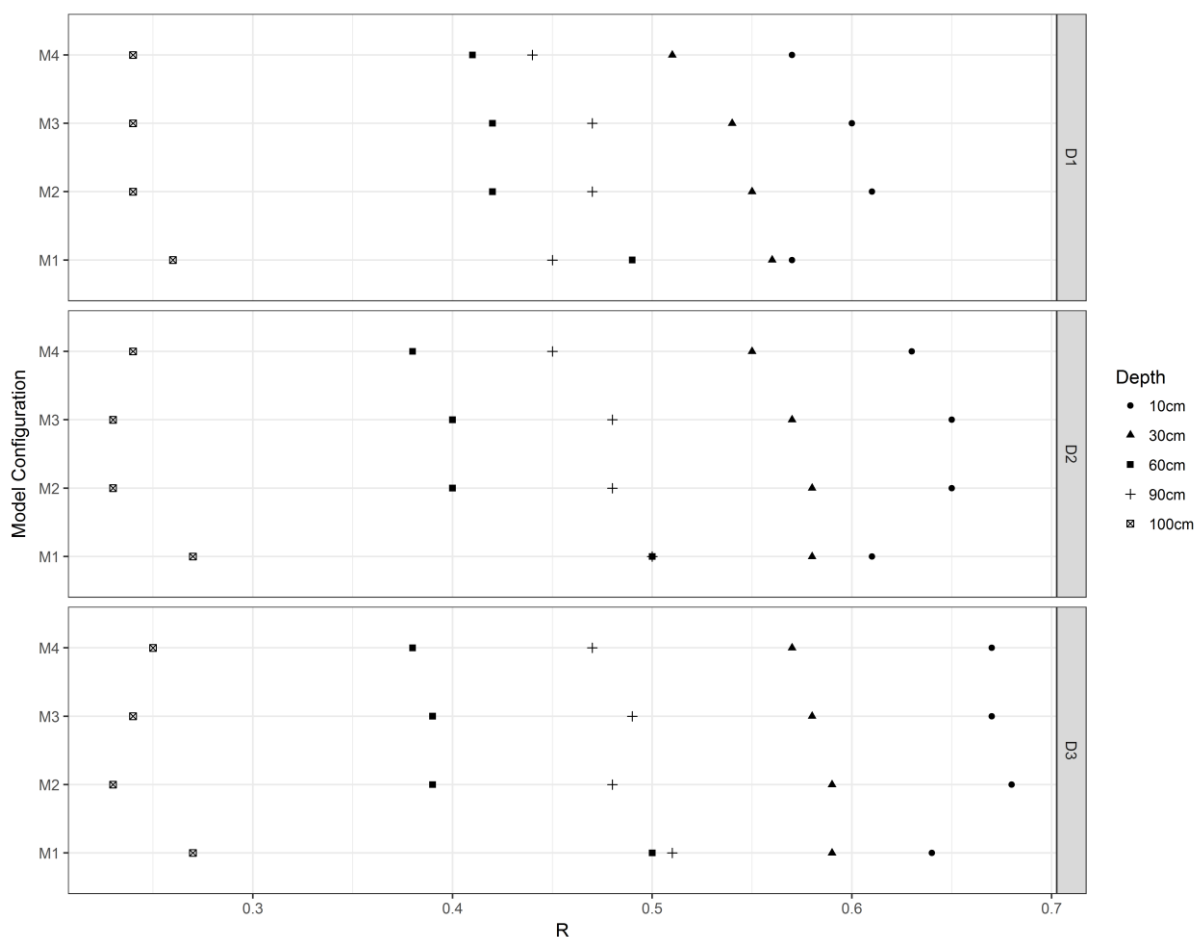


Abbildung 23: Korrelation von gemessener und modellierter Bodenfeuchte in verschiedenen Tiefen unter Berücksichtigung der Modellkonfigurationen M1 – M4 und Parametersätze D1 – D3

Im weiteren Verlauf soll das Modell durch die Einbindung von Bodentypen sowie der Landnutzung erweitert werden, um entsprechende Standard-Parametersets zu generieren. Die Charakteristik von Einzugsgebieten in Bezug auf die Modellierung der Bodenfeuchte wird demzufolge aus den dominierenden Bodentypen und Landnutzungsarten abgeleitet.

2.1.6. Konzeptionelle hydrologische Modellierung

Die Wahl der Modellstruktur eines konzeptionellen hydrologischen Modells ist eine wesentliche Quelle von Unsicherheit bei der Simulation und Vorhersage des Abflussverhaltens eines Einzugsgebietes. Im Gegensatz zum dem bisher häufig verwendeten Ansatz „ein Modell für alles“, bietet die flexible Modellierung die Möglichkeit die Modellstruktur sowohl an eine unterschiedlich stark ausgeprägte Datengrundlage, als auch an verschiedene Einzugsgebiets-Charakteristika anzupassen.

Für die Pilot- Einzugsgebiete Wernersbach und Große Ohe wurden zuerst sieben verschiedene Modellstrukturen, basierend auf einem einfachen Verständnis der Hochwassergeneese, sowie einfachen Modellstrukturen aus der Literatur (Kavetski and Fenicia 2011) konstruiert. Dabei wurde mit dem RAVEN Hydrological Framework und seiner Prozessdatenbank gearbeitet. Als Benchmark wurden zusätzlich zwei bekannte hydrologische Modelle (HBV-EC, GR4J) in ihrer Struktur nachgebaut. Das Wernersbach-Gebiet diente bisher als einfaches Testbeispiel. Für die Große Ohe wurden detailliertere Untersuchungen durchgeführt. Hierfür wurden die Modelle für das Einzugsgebiet in drei verschiedenen Diskretisierungen aufgebaut, um somit die Notwendigkeit einer hoch aufgelösten Betrachtungsweise zu untersuchen. Für die Parameteroptimierung wurde nach einigen Tests der CMA-ES Algorithmus gegenüber dem DREAM-Algorithmus bevorzugt. Dieser wurde in MATLAB mit dem RAVEN Modell-Setup gekoppelt. Das entstandene Framework wurde verwendet, um für die Große Ohe sieben Modellstrukturen in drei Diskretisierungen zu kalibrieren. Zusätzlich wurde der Datenzeitraum in fünf verschiedene Perioden eingeteilt, da die Große Ohe auf Grund eines Borkenkäferbefalls enormen Landnutzungsveränderungen unterlag. Diese Landnutzungsveränderungen hatten großen Einfluss auf die Abflussbildung im Einzugsgebiet (Schwarze and Burkhard 2009). Es wurde untersucht, ob eine bestimmte Modellstruktur in den unterschiedlichen Phasen der Landnutzungsänderung bevorzugt wird.

Erste Ergebnisse deuteten drauf hin, dass Phasen mit einer schnellen Abflussgenerierung eine andere Modellstruktur bevorzugten, als solche mit noch von der Landnutzungsänderung unbeeinflussten Abflussprozessen. Weiterhin konnte festgestellt werden, dass eine höhere räumliche Auflösung des Einzugsgebietes deutlich bessere Ergebnisse erzielen kann als ein räumlich nicht diskretisiertes (lumped) Modell.

Um die Wahl einer geeigneten Modellstruktur zu unterstützen wurde die umfangreiche Prozessbibliothek des RAVEN Hydrological Frameworks verwendet um ein Tool zur Automatischen Model Struktur Identifikation (AMSI) zu entwickeln. Dieses Tool basiert auf einem zuvor definierten maximalen Modellraum, aus dem die potentiell geeignetste Modellstruktur durch Kalibrierung gegen den Gebietsabfluss ermittelt wird.

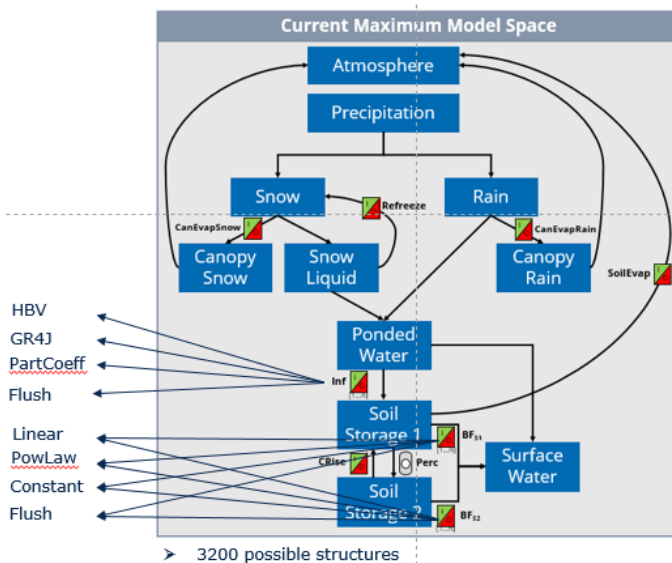


Abbildung 24: Maximaler Modellraum des AMSI-Tools

Der maximale Modellraum für das erste Test-Setup besteht aus zwei konzeptionellen Bodenspeichern welche durch einen Perkulationsprozess miteinander gekoppelt sind (Abbildung 24). Abgesehen von der Perkolation können alle weiteren Prozesse (Infiltration, Speicherausfluss, Interzeption, Evaporation, etc.) an bzw. aus geschaltet werden. Für die beiden Speicherausflüsse und den Infiltrationsprozess stehen zudem unterschiedliche Prozessbeschreibungen (mathematische Formulierungen) zu Verfügung die untereinander ausgetauscht werden können, wenn der Prozess „angeschaltet“ ist. Durch an-, aus- und umschalten der verschiedenen Prozessbeschreibungen können insgesamt 3200 unterschiedliche Modellstrukturen aus diesem maximalen Modellraum gebildet werden. Das AMSI-Tool optimiert neben einer geeigneten Modellstruktur simultan die Prozessparameter die einige Prozessbeschreibungen benötigen. Insgesamt gibt es 9 Parameter die kalibriert werden. Die maximal mögliche Parameteranzahl einer Modellstruktur beträgt 7 Parameter.

	MMV1	MMV2	RMV1	RMV2
Snow Refreeze	X	X		
Canopy Evap. Rain	X	X		X
Canopy Evap. Snow	X	X		
Soil Evap.	X	X	X	X
Inf (HBV)	X			X
Inf (GR4)		X	X	
Interflow S1	X			
BF Linear S1		X	X	
BF Power Law S1				X
Percolation	X	X	X	X
Capillary Rise	X	X		
Interflow S2				X
BF Linear S2			X	
BF Power Law S2	X	X		
# of Parameters	6	5	3	5

Abbildung 25: Prozessauswahl für die vier ausgewählten Benchmark Modelle

Für die Überprüfung der Funktionsweise des AMSI-Tools wurden aus dem definierten maximalen Modellraum vier Strukturen definiert die als Benchmark gelten. Abbildung 25 gibt einen Überblick über die gewählten Modellstrukturen. MMV1 und MMV2 verwenden die

maximal mögliche Anzahl von Prozessen unterscheiden sich jedoch in ihrer Auswahl der Prozessbeschreibungen für Infiltration und Speicherausfluss. RMV1 und RMV2 sind zufällig ausgewählte mögliche Modellstrukturen. Die Parameteranzahl der Benchmark Strukturen liegt zwischen 3 und 6 Parametern.

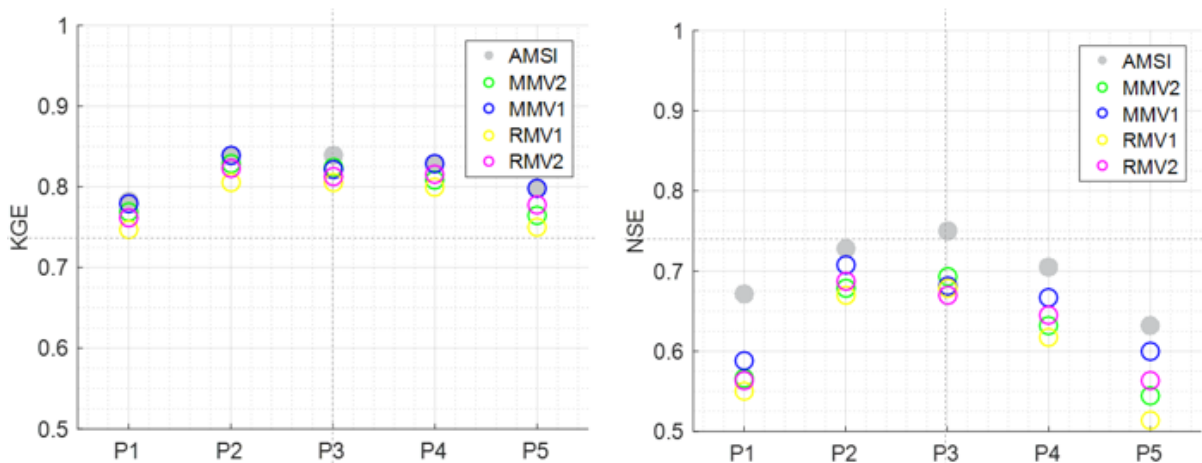


Abbildung 26: Vergleich der durch das AMSI-Tool automatisch identifizierten Modellstrukturen mit vier Benchmark Modellstrukturen für alle 5 Vegetationsperioden des Einzugsgebietes der Großen Ohe und für 2 unterschiedliche Zielfunktionen (Kling Gupta Efficiency und Nash Suthcliff Efficiency)

Vergleicht man die Leistung der durch das AMSI Tools identifizierten Modellstruktur mit den festgelegten Benchmark Strukturen für zwei unterschiedliche Optimierungsziele kann festgestellt werden, dass das AMSI Tool in der Lage ist eine bessere oder zumindest gleichwertige Modellstruktur zu identifizieren. Abbildung 26 zeigt die Ergebnisse für alle 5 ausgewählten Vegetationsperioden des Einzugsgebiets der Großen Ohe. Die automatisch identifizierten Modellstrukturen des AMSI-Tools zeigen insbesondere bei einer Optimierung für den Nash-Suthcliff Koeffizienten (NSE) bessere Ergebnisse als die Benchmark Strukturen.

Im weiteren Verlauf soll das AMSI-Tool erweitert werden um Modellstrukturen auf Basis von Informationen zur Datenverfügbarkeit (Komplexität der Prozessbeschreibungen + Parameter) und der Einzugsgebiets-Charakteristik (maximaler Modellraum, teilfixierte Strukturen) identifizieren zu können. Im Rahmen des Projektes soll für die Pilotgebiete so eine „optimale“ konzeptionelle Modellstruktur oder ein geeignetes Modellensemble zur Abflussvorhersage identifiziert werden. Offene Fragen sind hierbei unter anderem welche Zielfunktion zu einer geeigneten Modellstruktur führen kann. Verschiedene Szenarien bezüglich der Datengrundlage oder Zielfunktion können helfen, eine detailliertere Unsicherheitsbewertung für die geplanten operativen Durchflussvorhersagen durchzuführen. Weitere geplante Untersuchungen sollen sich damit auseinandersetzen, welcher minimale Umfang an Messdaten operativ erhoben werden muss, um eine zuverlässige operationelle Hochwasservorhersagen zu erzielen.

2.1.7. Datengetriebene hydrologische Modellierung

In den letzten Jahren wurden zahlreiche datengetriebene Methoden des Maschinellen Lernens in die hydrologische Modellierung eingeführt. Der Vorteil gegenüber den klassisch verwendeten, konzeptionellen Ansätzen in der Modellierung sind die scheinbar

hohe Leistungsfähigkeit, der vergleichbar geringe Implementierungsaufwand und die geringe Rechenzeit der Modelle. Vor allem letzteres ist im Fall von Extremereignissen sehr wichtig, da im operationellen Fall oft nur wenig Zeit für eine Warnung verfügbar ist. Weiterhin ist die Einbindung verschiedener Informationen, z.B. Niederschlagsvorhersagen oder anderer messbarer Größen, einfacher realisierbar als bei konzeptionellen oder physikalisch basierten Modellansätzen. Moderne datengetriebene Methoden zeigen dabei ein hohes Potential auf, verschiedene Informationsarten, wie z.B. Bildsequenzen, zu verarbeiten. Somit ist es möglich das Spektrum der Datenanalyse zur Hochwasservorhersage aus unterschiedlichen Quellen zu erweitern und ein leistungsfähiges Frühwarnsystem zu erstellen.

Verschiedene Untersuchungen zeigen allerdings auch essentielle Probleme, die bei der Nutzung datengetriebener Ansätze auftreten können. Eines davon ist der sogenannte Phasenfehlereffekt. Die wenigen vorhandenen Studien zur Reduzierung dieses Effektes (Varoonchotikul 2003) scheinen bei der Übertragung auf sächsische Einzugsgebiete nicht ausreichend zu sein und sind operationellen nicht direkt anwendbar. Da den Ursachen des Phasenfehlers in Veröffentlichungen bisher kaum Beachtung geschenkt wurde (de Vos and Rientjes 2005), werden im Rahmen des EXTRUSO-Projektes systematische Untersuchungen und Experimente durchgeführt, um die genauen Ursachen zu identifizieren. Im Laufe dieser Untersuchungen werden circa 50 sächsische kleinräumige Einzugsgebiete modelliert und unter verschiedenen Gesichtspunkten betrachtet, um eine direkte Verbindung zum Auftreten des Phasenfehlers und dessen Stärke zu eruieren. Hierbei zeigt sich, dass ein großer Teil der betrachteten Hochwasserereignisse der 50 Einzugsgebiete von einem Phasenfehler beeinflusst ist. Die Hochwasservorhersagen dieser Ereignisse können demnach als unbrauchbar eingestuft werden. Die restlichen Ereignissimulationen und auch Teile der phasenfehlerbehafteten Vorhersagen sind zusätzlich von starken Oszillationen betroffen. Auch dies kann zu einer Unbrauchbarkeit der Vorhersagen führen. Nur ein kleiner Teil der Vorhersagen kann als größtenteils fehlerfrei und akkurat betrachtet werden. Es konnte außerdem ermittelt werden, dass der Effekt des Phasenfehlers ein kleinskaligerer Effekt ist, als bisher von einschlägigen Veröffentlichungen angenommen wurde. Eine Korrelation zwischen Auftreten sowie Stärke des Phasenfehlers und den Zeitreiheneigenschaften der Autokorrelation sowie Kreuzkorrelation (bezogen auf die gesamte Zeitreihe der Modellierung) konnte nicht festgestellt werden. Der Effekt des Phasenfehlers scheint daher auf einer deutlich kleineren Skala verursacht zu werden, welche selbst innerhalb eines Ereignisses zu einer Heterogenität in der Stärke des Phasenfehlers führt. Ebenso kann anhand einiger Versuche angenommen werden, dass das Auftreten des Phasenfehlers auch unabhängig von der Modellkonfiguration ist, welche beim Modelltraining erlernt wird. Damit können auch unzureichend trainierte Modelle als Ursache für den Phasenfehler ausgeschlossen werden.

Neben den durchgeführten Untersuchungen wurde auch eine Literaturrecherche durchgeführt, welche das Ziel hat, bereits veröffentlichte Methoden zur Phasenfehlerreduktion zu sammeln und zu analysieren. Das Problem in der Literaturrecherche liegt darin, dass der Phasenfehler oft nicht als solcher benannt beziehungsweise Schlagwörter nicht damit verknüpft werden. Bislang wurden zwei potentielle Methoden zur Reduktion von Phasenfehlern und Oszillationen gefunden (Wu and Chau 2011; Santos and Silva 2014). Diese

können das Problem allerdings nicht vollständig beheben und sind teilweise nicht operationalisierbar.

Die im EXTRUSO-Projekt durchgeführten Studien ergeben eine systematische und breite Untersuchung der genannten Fehlererscheinungen. Hierbei wurden zunächst verschiedene spezifische Fehlermaße implementiert, um jeder Fehlerart in den Modellauswertungen gerecht zu werden. Dabei konnten alle drei Fehlerarten mit einer hohen Häufigkeit, besonders im Bereich des Phasenfehlers, nachgewiesen werden. Zusätzlich wurde die Auswertungsskala von zeitreihenbasiert auf ereignisbasiert reduziert, um ein noch genaueres Bild des Fehlerauftretens zu erhalten. Dies führte zu einer höheren Anzahl fehlerbehafteter Vorhersagen, mit zusätzlich zunehmender Fehlerstärke. Nur ein kleiner Teil der Vorhersagen kann als fehlerfrei betrachtet werden. Nach dieser Inventarisierung der Fehlertypen, wird als nächster Schritt bei der Ursachenuntersuchung angesetzt.

Ein weiteres Potential der datengetriebenen Modellierung zeigt sich in der Verknüpfung zur low-cost kamerabasierten Wasserstandsmessung. Hierbei werden Methoden der automatisierten Bilderkennung bezüglich ihrer Nutzbarkeit und Performanz getestet. Ziel ist es ein Produkt zu entwickeln, welches in der Lage ist den Wasserstand aus Bildern zu erkennen und in ein genaues Geländemodell zu projizieren. Im Gegensatz zu bisherigen Anwendung sind dabei keine festen Referenzpunkte nötig, um die Wasserspiegellage zu verorten.

2.1.8. Informationsbereitstellung

Eine der wesentlichen Aufgaben der Informationsinfrastruktur in EXTRUSO ist die Bereitstellung von Informationen im Kontext hydro-meteorologischer Extremereignisse. Dafür müssen die multidisziplinären Einzelkomponenten in einem Gesamtsystem integriert und über Schnittstellen verfügbar gemacht werden. Grundlegende Eigenschaften einer dienstbasierten Architektur, wie Interoperabilität, Wiederverwendbarkeit und Transparenz, spielen dabei eine entscheidende Rolle. Das Hauptaugenmerk der Informationsbereitstellung liegt auf der Bereitstellung von Informationen zu historischen, aktuellen und prognostizierten hydro-meteorologischen Extremereignissen in Form von Datensätzen, Modellergebnissen, Graphiken oder Texten, die allesamt der Außenkommunikation dienen. Zur Förderung des wissenschaftlichen Diskurses und der Reproduzierbarkeit von wissenschaftlichen Arbeiten wird zudem angestrebt Quelltexte, Skripte und Modellkonfigurationen zu veröffentlichen, sofern dem keine lizenzrechtlichen oder organisatorischen Gründe entgegenstehen.

Derzeit umfasst die Homepage des EXTRUSO-projektes² allgemeine Informationen zum Projekt und den Projektzielen, eine regelmäßig aktualisierte News-Seite, sowie eine interaktive Kartenanwendung. Letztere stellt den Einstiegspunkt in das Informationssystem dar und wird sukzessive mit weiteren Komponenten erweitert. Diese umfassen u.a. ein gemeinsames Daten- und Metadatenmanagement, die Dokumentation und Aufrufmöglichkeit entwickelter Komponenten sowie die in (Wiemann et al. 2018) entwickelten Prozessmodule zur Analyse und Kombination verteilter Datenquellen.

² <https://extruso.bu.tu-dresden.de>

Hydro-meteorologischen Daten aus amtlichen Sensormessnetzen müssen von den jeweils zuständigen Behörden frei zugänglich gemacht werden. Allerdings erschweren fehlende Standards, z.B. hinsichtlich der Datenstruktur oder der Datenbereitstellung, die automatisierte Nutzung (Attard et al. 2015). Im EXTRUSO-Projekt wird daher OpenSensorWeb³ als Datenaggregator genutzt, um eine Vielzahl von Sensormessdaten über eine einheitliche Schnittstelle, in diesem Fall die Elasticsearch API, einzubinden. Des Weiteren werden aktuelle und historische Regenradarmessungen, bereitgestellt über Open Data Plattform⁴ des DWD, im Informationssystem bereitgestellt. Um die darauf basierende Abfrage von Zeitreihen zu beschleunigen, werden diese in NetCDF konvertiert. Dies umfasst sowohl die einmalige Transformation historischer als auch die laufende Synchronisierung aktueller Radardaten. Durch die Implementierung unterstützt werden derzeit die RADO-LAN Produkte RW, RX, SF und FX.

Neben der Visualisierung und Analyse von Modellergebnissen besteht die Möglichkeit hydro-meteorologische Modelle direkt an das Informationssystem anzubinden. Dies erfolgt in zwei Schritten. Zunächst werden Modelle anhand verfügbarer historischer Daten kalibriert und parametrisiert. Zu diesem Zweck können sowohl im Informationssystem vorgehaltene, als auch extern bereitgestellte Datenquellen genutzt werden. Sobald dieser Schritt erfolgt ist, können die Modelle im Informationssystem registriert und für den beschriebenen Anwendungsfall genutzt werden. Wie in Abbildung 27 dargestellt, gibt es dabei drei Möglichkeiten: 1) eine web-basierte Implementierung des Modells im Informationssystem, 2) die Anbindung über eine bereitgestellte Web-Schnittstelle der Modellimplementierung und 3) die Kapselung einer Modellimplementierung über eine OGC Web Processing Service (WPS) Schnittstelle. Letztere ermöglicht neben der Nutzung und Verknüpfung bereits registrierter Modelle auch die Erweiterung durch externe, durch Dritte bereitgestellte Modelle (vgl. Castronova et al. 2013).

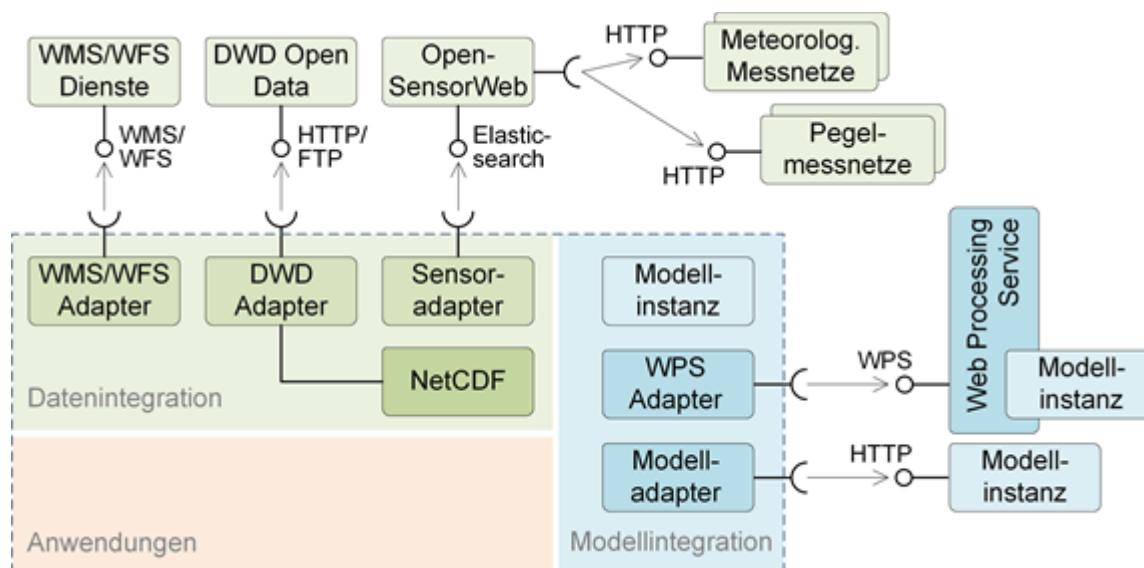


Abbildung 27: Möglichkeiten zur Daten- und Modellintegration im Informationssystem

³ <https://opensensorweb.de>

⁴ <https://opendata.dwd.de>

Die Modellierung der Bodenfeuchte basiert auf dem BROOK90 Modell (vgl. Kapitel 2.1.5). Ein großer Teil der für die Ausführung des Modells notwendigen meteorologischen Daten kann über das Informationssystem bereitgestellt werden, was die Registrierung und Anwendung des Modells vereinfacht. Zudem wurde eine R-Implementierung entwickelt, die die Anbindung des Modells über die verwendete OpenCPU Plattform⁵ ermöglicht. Im weiteren Verlauf soll auch die hydrologische Modellierung integriert werden. Zudem sollen Strategien zur Einbindung nutzergenerierter Daten (z.B. Umweltbeobachtungen) konzipiert und in dem Informationssystem eingebunden werden. Das Ziel ist dabei die Entwicklung einer kollaborativen Plattform für Bürger und Entscheidungsträger, die zur Bewusstseinsbildung und einem besseren Verständnis über Genese, Verlauf und Auswirkung hydro-meteorologischer Extremereignissen beiträgt.

2.1.9. Geodatenfusion

Prozesse zur Geodatenfusion sind ein essentieller Teil der geplanten Informationsinfrastruktur, da sie wesentlich zum Erkenntnisgewinn aus einer Vielzahl verteilter, heterogen strukturierter Datensätze beitragen können. Wesentliche Grundlagen und einzelne Teilprozesse, auf denen das geplante Informationssystem aufbaut, sind in (Wiemann and Bernard 2016) und (Wiemann 2017) beschrieben. Der Quelltext der in Entwicklung befindlichen Anwendung ist unter Open Source Lizenz frei verfügbar⁶. Die modulare Struktur der Implementierung erlaubt den Einsatz der entwickelten Methoden für eine Vielzahl von Anwendungsfällen. Im Laufe der weiteren Entwicklung sollen EXTRUSO-spezifische Anforderungen berücksichtigt werden, um die bestehende Implementierung so zu erweitern, dass sie als unabhängige Komponente im Informationssystem eingesetzt werden kann. Die Idee dahinter ist die Schaffung verschiedener Möglichkeiten verteilte Datenquellen zu verknüpfen und aus diesen Verknüpfungen im Bedarfsfall einen Informationsmehrwert abzuleiten. Dies kann sowohl über generische Prozesse, wie z.B. die Ermittlung topologischer Beziehungen oder die Korrelationsanalyse zweier Zeitreihenreihen, als auch über spezialisierte Prozesse, wie z.B. die kombinierte Niederschlagschätzung aus in situ Messstation und Bodenradar, erfolgen. Die Einbindung der entsprechenden Funktionalität in das Informationssystem ist, analog zu den Modellen, über eine web-basierte Implementierung, die Einbindung einer Web-Schnittstelle oder die Kapselung über einen WPS möglich.

2.2. Prozesse und Prozessabläufe

Die grundlegenden, für die Umsetzung des geplanten Informationssystems notwendigen Prozesse, sind in Abbildung 28 dargestellt. Diese lassen sich zwei, im Folgenden näher beschriebenen, Kategorien zuweisen: dem Aufbau der Informationsgrundlage sowie der darauf aufbauenden Analyse und Prognose von hydro-meteorologischen Extremereignissen.

⁵ <https://www.opencpu.org>

⁶ <https://github.com/GeoinformationSystems/SpatialDataFusion>

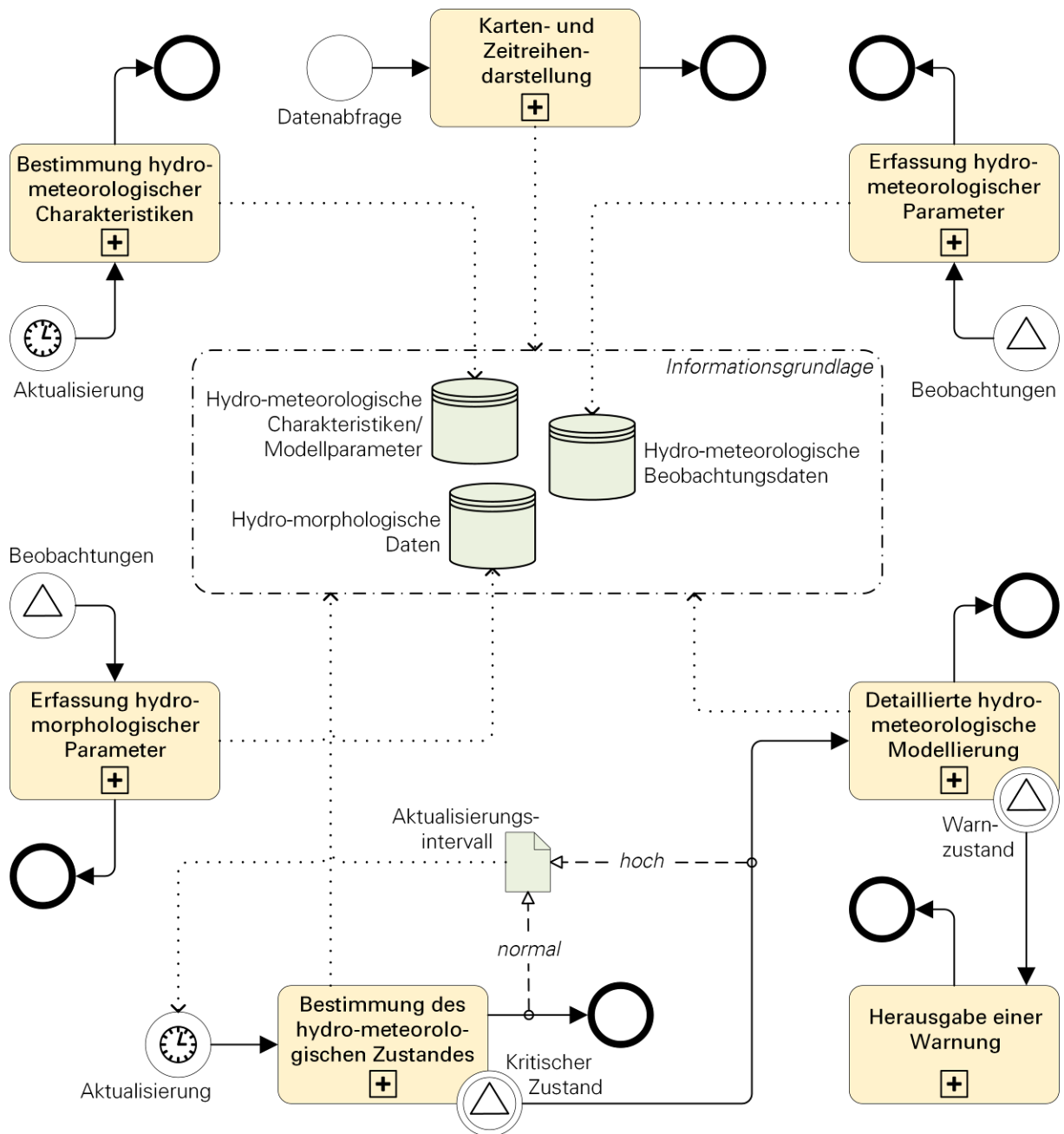


Abbildung 28: Grundlegende Prozessabläufe im EXTRUSO-Projekt
(Notation: BPMN – Business Process Model and Notation)

2.2.1. Schaffung der Informationsgrundlage

Die Grundlage für die in EXTRUSO konzipierte Informationsinfrastruktur ist eine Sammlung verschiedener heterogen strukturierter Informationen. Dies beinhaltet unter anderem hydro-meteorologische und -morphologische Datensätze, Beschreibungen der Einzugsgebiete und verwendete Modellparameter. Die drei wesentlichen Prozesse, die zur Erzeugung dieser Informationsgrundlage beitragen sind entsprechend die Erfassung hydro-meteorologischer Daten, die Erfassung hydro-morphologischer Daten sowie die Bestimmung hydro-meteorologischer Charakteristiken.

Die Erfassung von Daten umfasst sowohl die Akquise vorhandener, aktueller oder historischer, Daten aus existierenden Geodateninfrastrukturen, hydro-meteorologischen Netzwerken und jeweils zuständigen Behörden, als auch die Erfassung neuer Daten. Letzteres geschieht im Wesentlichen durch die im Absatz 2.1 beschriebenen Methoden zur Datenerzeugung, insbesondere der Disaggregation von Radardaten, der photogrammetrischen Erfassung von Topographie und Wasserstand sowie der Niederschlagsmessung über low-cost Messsysteme. Auch die Entwicklung von Strategien zum Crowdsourcing spielt dabei eine wichtige Rolle.

Die Bestimmung hydro-meteorologischer Charakteristiken umfasst einerseits die Beschreibung der Einzugsgebiete und andererseits die Parametrisierung hydro-meteorologischer Modelle. Ersteres beinhaltet im Wesentlichen die Klassifikation von Einzugsgebieten anhand auf einer Reihe von Eigenschaften, wie z.B. Landbedeckung und Landnutzung, vorherrschende Bodenarten, Topographie oder Relief. Letzteres basiert dahingegen auf der Analyse historischer hydro-meteorologischer Daten und dient dem Training der verwendeten hydro-meteorologischen Modelle.

Die Prozesse zum Aufbau der Informationsgrundlage für EXTRUSO sind allesamt kontinuierlich ablaufende Prozesse, die in regelmäßigen Abständen Informationen ergänzen, aktualisieren oder ersetzen können. Als Startpunkt für den jeweiligen Prozess können vorhandene neue Beobachtungen, z.B. aus einem Sensornetzwerk oder einer Messkampagne, oder eine regelmäßig durchgeführte Aktualisierung von Bestandsdaten dienen.

2.2.2. Analyse und Prognose hydro-meteorologischer Extremereignisse

Ein wesentlicher Bestandteil des konzipierten Informationssystems ist die Abgabe von Informationen an Bürger, Entscheidungsträger oder andere Wissenschaftler. Dies erfolgt im Wesentlichen über Beiträge auf der EXTRUSO Homepage, inklusive interaktiver Karten und Zeitreihendarstellungen. Als Grundlage wird dabei die gesammelte Informationsgrundlage verwendet, auf die potentielle Nutzer über vordefinierte oder eigene Datenabfragen zugreifen können. Die Abfrage von Informationen kann, abhängig von der Herkunft und Struktur, über standardisierte Schnittstellen, z.B. durch das OGC (Open Geospatial Consortium) spezifizierte Daten- und Prozessierungsdienste, über in die Homepage eingebettete Inhalte oder über indirekten Datenbankzugriff erfolgen. Letzterer basiert, je nach Datenbank, auf standardisierten Abfragesprachen wie SQL (Structured Query Language) für relationale Datenbanken oder SPARQL (SPARQL Protocol and RDF Query Language) für Graphendatenbanken.

Das zentrale Element des geplanten Informationssystems ist die Echtzeit-Warnung vor hydro-meteorologischen Extremereignissen mit Fokus auf kleinen und mittleren Einzugsgebieten. Diese greift auf aktuelle Daten und Modellierungsergebnisse zu und zielt auf die Identifikation von kritischen Zuständen und potentielle Gefährdungen durch, in naher Zukunft auftretende, hydro-meteorologische Extremereignisse. Wie in Abbildung 28 dargestellt, wird in einem regelmäßigen Intervall der gegenwärtige hydro-meteorologische Zustand der betrachteten Einzugsgebiete bestimmt. Diese basiert im Wesentlichen auf der Modellierung der Vorfeuchte sowie kurz- und mittelfristiger Wettervorhersagen. Im Falle eines unkritischen Status wird das reguläre Aktualisierungsintervall beibehalten. Falls ein

kritischer Status erreicht wird, wird das Aktualisierungsintervall erhöht und eine detaillierte hydro-meteorologische Modellierung durchgeführt. Diese fokussiert auf die zuvor als kritisch eingestuften Einzugsgebiete und entwickelt eine Reihe von What-If-Szenarien zur Klassifikation potentieller Gefahrensituationen und -gebiete. Ab einem zuvor festgelegten Schwellwert kann anschließend eine Warnung für die betroffenen Gebiete herausgegeben werden. Falls dieser Schwellwert nicht erreicht wird, wird der Status in dem zuvor erhöhten Aktualisierungsintervall erneut geprüft.

2.3. Prototypentwicklung

Der Schwerpunkt der derzeitigen Entwicklungen liegt auf der Erstellung eines ersten Prototyps, der es ermöglicht die zentralen, in Entwicklung befindlichen Komponenten des Projektes unter realen Bedingungen im Feld zu testen. Die betrifft vor allem die Erprobung der low-cost Sensorik sowie die photogrammetrischen Messungen via UAV und UUV. Da die Stromversorgung für die Ermittlung erster Testdaten von entscheidender Bedeutung ist, wurde der Pegel Elbersdorf an der Wesenitz ausgewählt, da hier eine kontinuierliche Stromversorgung sichergestellt ist. Im weiteren Verlauf des Projektes werden Solarpanele genutzt, um einen autarken Betrieb der Messstationen zu ermöglichen.

Die Umsetzung der Modelle und des Informationssystems im Zusammenhang mit dem Prototyp erfolgt parallel in den jeweiligen Arbeitspaketen. Die Kernkomponente der Implementierung bildet derzeit die OpenCPU Plattform, über die R Funktionalität online bereitgestellt werden kann. Das darunterliegende R Paket wird im Rahmen des EXTRUSO-Projektes entwickelt und ist als Open Source verfügbar⁷. Das Paket umfasst unter anderem folgende Prozesse:

- Lesen von RADOLAN Bodenradardaten von der OpenData Plattform des DWD
- Extraktion von Regenzeitreihen aus Radardaten über das NetCDF Format
- Berechnung von Gewässereinzugsgebieten an beliebigen Punkten
- Lesen von OpenSensorWeb Messdaten
- Berechnung zonaler Statistiken für Einzugsgebiete
- Berechnung der Bodenfeuchte über das BROOK90 Modell

Durch die modulare Struktur des Informationssystems können einzelne Komponenten sowohl separat als auch in beliebiger Kombination eingesetzt werden. Dies ermöglicht eine Reihe verschiedener Anwendungsfälle mit unterschiedlichen Komplexitätsgraden, Informations- und Interaktionsmöglichkeiten. Der entwickelte Kartenclient unterstützt die Abfrage und Visualisierung von Daten über die jeweils bereitgestellten Schnittstellen. In Kartenform sind dies zum einen der WMS, u.a. verwendet zur Integration von DWD Radardaten, als auch der WFS, über den z.B. die Geometrien der Einzugsgebiete eingebunden werden. Die darunterliegende Funktionalität basiert auf der JavaScript Bibliothek OpenLayers⁸. Für die Anzeige verfügbarer Sensorstationen wird die Elasticsearch API von

⁷ https://github.com/GeoinformationSystems/xtruso_R

⁸ <https://openlayers.org>

OpenSensorWeb genutzt. Die Zeitreihenvisualisierung für Messdaten erfolgt über dynamisch erzeugte Diagramme unter Verwendung der JavaScript Bibliothek D3⁹. Ein Screenshot der Anwendung mit den entsprechenden Elementen ist in Abbildung 29 dargestellt. Der Quellcode der Anwendung ist ebenfalls als Open Source verfügbar¹⁰.

Neben der Visualisierung wird auch die Möglichkeit zum Datendownload über die darunterliegenden Schnittstellen angeboten, um sie für weitere Analysen im Informationssystem oder extern nutzen zu können. Ersteres kann direkt über die OpenCPU Plattform geschehen, in der R Befehle genutzt werden können, um z.B. Zeitreihen statistisch auszuwerten.

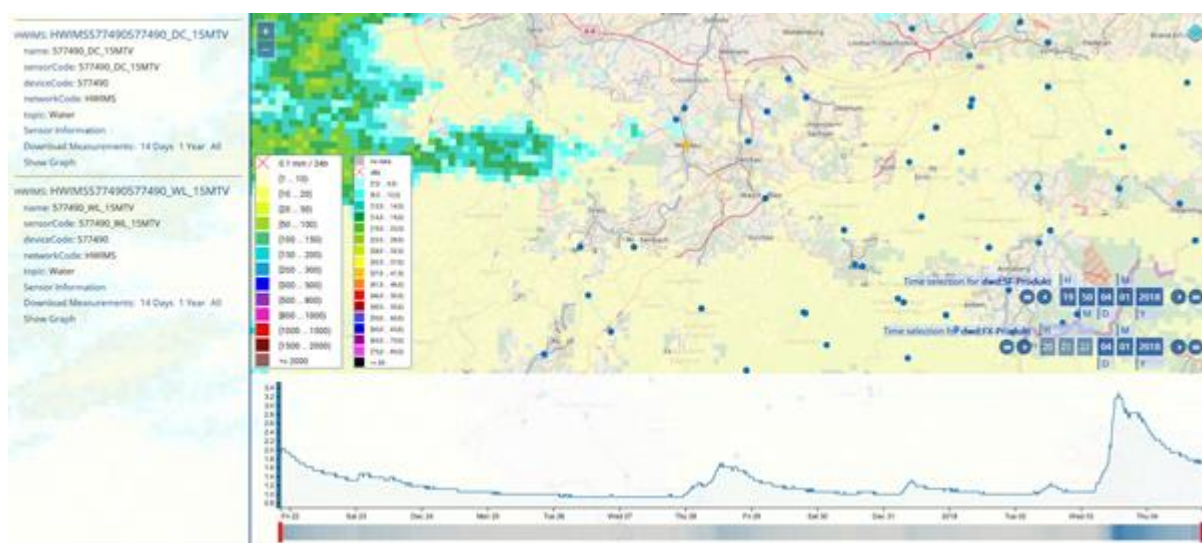


Abbildung 29: Screenshot der Anwendung zur Exploration vorhandener Daten und Messzeitreihen (dargestellt sind Radarniederschlag, Sensorinformationen und Zeitreihe einer Pegelmessung).

2.4. Literaturverzeichnis

- Attard J, Orlandi F, Scerri S, Auer S (2015) A systematic review of open government data initiatives. *Gov Inf Q* 32:399–418. doi: 10.1016/J.GIQ.2015.07.006
- Castronova AM, Goodall JL, Elag MM (2013) Models as web services using the Open Geospatial Consortium (OGC) Web Processing Service (WPS) standard. *Environ Model Softw* 41:72–83. doi: 10.1016/j.envsoft.2012.11.010
- Clapp RB, Hornberger GM (1978) Empirical equations for some soil hydraulic properties. *Water Resour Res* 14:601–604. doi: 10.1029/WR014i004p00601
- de Vos NJ, Rientjes THM (2005) Constraints of artificial neural networks for rainfall-runoff modelling: trade-offs in hydrological state representation and model evaluation. *Hydrol Earth Syst Sci* 9:111–126. doi: 10.5194/hess-9-111-2005
- Federer CA (2002) BROOK 90: A simulation model for evaporation, soil water, and streamflow. <http://www.ecoshift.net/brook/brook90.htm>.

⁹ <https://d3js.org>

¹⁰ https://github.com/GeoinformationSystems/xtruso_web

- Kavetski D, Fenicia F (2011) Elements of a flexible approach for conceptual hydrological modeling: 2. Application and experimental insights. *Water Resour Res.* doi: 10.1029/2011WR010748
- Mader D, Blaskow R, Westfeld P, Maas H-G (2015) UAV-based Acquisition of 3D Point Clouds - A Comparison of a Low-Cost Laser Scanner and SfM Tools. *ISPRS - Int Arch Photogramm Remote Sens Spat Inf Sci XL-3/W3:335–341.* doi: 10.5194/isprsarchives-XL-3-W3-335-2015
- Rinderer M, Seibert J (2012) Soil Information in Hydrologic Models. In: *Hydropedology.* Elsevier, pp 515–536
- Santos CAG, Silva GBL (2014) Daily streamflow forecasting using a wavelet transform and artificial neural network hybrid models. *Hydrol Sci J* 59:312–324. doi: 10.1080/02626667.2013.800944
- Sardemann H, Eltner A, Maas H-G (2018) Erfassung von Geometriedaten kleiner Flüsse mit einem unbemannten Wasserfahrzeug als Multi-sensor-Plattform. In: *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V. Nr. 27, 38. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF und PFGK18 Tagung.* pp 389–396
- Schwarze R, Burkhard B (2009) Analyse der Hochwassergenese und des Wasserhaushaltes eines bewaldeten Einzugsgebietes unter dem Einfluss eines massiven Borkenkäferbefalls. *Hydrol und Wasserbewirtschaftung* 53:236–248.
- Varoonchotikul P (2003) Flood forecasting using artificial neural Networks. *Universiteit Amsterdam und Technische Universiteit Delft*
- Wiemann S (2017) Formalization and web-based implementation of spatial data fusion. *Comput Geosci* 99:107–115. doi: 10.1016/j.cageo.2016.10.014
- Wiemann S, Bernard L (2016) Spatial data fusion in Spatial Data Infrastructures using Linked Data. *Int J Geogr Inf Sci* 30:613–636. doi: 10.1080/13658816.2015.1084420
- Wiemann S, Karrasch P, Bernard L (2018) Ad-hoc combination and analysis of heterogeneous and distributed spatial data for environmental monitoring – design and prototype of a web-based solution. *Int J Digit Earth* 11:79–94. doi: 10.1080/17538947.2017.1326984
- Wu CL, Chau KW (2011) Rainfall-runoff modeling using artificial neural network coupled with singular spectrum analysis. *J Hydrol* 399:394–409. doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.01.017

3. ERREICHUNG DER PROJEKTZIELE

3.1. Förderpolitische Ziele

Das förderpolitische Ziel des EXTRUSO-Projektes ist die Entwicklung umfangreicher Kompetenzen im Bereich innovative Umwelttechnologien und -services. Die Nachwuchswissenschaftler sind bestrebt, ihre fachlichen, sozialen und organisatorischen Kompetenzen stetig auszubauen. Dies erfolgt durch einen intensiven Austausch zwischen den Teilnehmern, die regelmäßige Organisation und Durchführung von Projekttreffen, die Teilnahme an Qualifizierungsmaßnahmen, sowie den Besuch von nationalen und internationalen Konferenzen.

3.2. Inhaltliche Ziele

Die im Projektantrag dargelegten inhaltlichen Ziele des EXTRUSO-Projektes sind 1) ein Wissensgewinn zu Entstehungsmechanismen kleinräumiger hydro-meteorologischer Extremereignisse, 2) die Verbesserung der Vorhersagegüte für kleinräumige hydro-meteorologische Extremereignisse und 3) Strategien zur Entwicklung kollaborativer Informations- und Frühwarnsysteme. Diese sind in den entsprechenden Arbeitspaketen 1, 2 und 3 abgebildet. Der aktuelle Stand der Umsetzung der einzelnen Arbeitspakete ist in Abschnitt 3.4 beschrieben.

Im Vergleich zum Projektantrag gibt es zwei Abweichungen, die sich nach aktueller Planung jedoch nicht auf die Erreichbarkeit der Projektziele auswirken. Zum einen werden die im Projektantrag (Anhang C) genannten Einzugsgebiete Rotherdbach (Osterzgebirge) und Wilde Weißeritz (Osterzgebirge) nicht weiter betrachtet und stattdessen durch die EZG Wernersbach (Tharandter Wald) und Mandau (Osterzgebirge) ersetzt. Dafür sprachen im Wesentlichen die bessere Verfügbarkeit historischer und laufender Messdaten, die Erreichbarkeit durch die Projektteilnehmer, das Teilnehmerpotential für Crowdsourcing-Kampagnen sowie eine gute photogrammetrische Erfassbarkeit. Die Anwendung von Projektergebnissen auf die beiden ursprünglich genannten EZG in der Validierungs- und Transferphase des Projektes ist jedoch nicht ausgeschlossen.

Die zweite Abweichung ergibt sich aus einer Verzögerung bei der Stellenbesetzung der Promotionsstelle in der Geoinformatik. Dies betrifft die Arbeitspakete 3.1 (Entwicklung der kollaborativen Informationsinfrastruktur), und 1.1 (low-cost Sensorik für die Erfassung hydro-meteorologischer Parameter). Weite Teile der notwendigen Arbeiten in AP 3.1 konnten durch die übrigen Projektmitarbeiter in der Geoinformatik kompensiert werden. Für notwendige Arbeiten in AP 1.1 wurden qualifizierte wissenschaftliche Hilfskräfte eingesetzt, so dass die geplanten Messsysteme trotz der Verzögerung bereits in der ersten Messperiode 2017 aufgebaut, ausgebracht und getestet werden können. Dies entspricht weitestgehend der ursprünglichen Planung für den Einsatz der entsprechenden low-cost Sensoren.

3.3. Zeitplan (Stand Mai 2018)

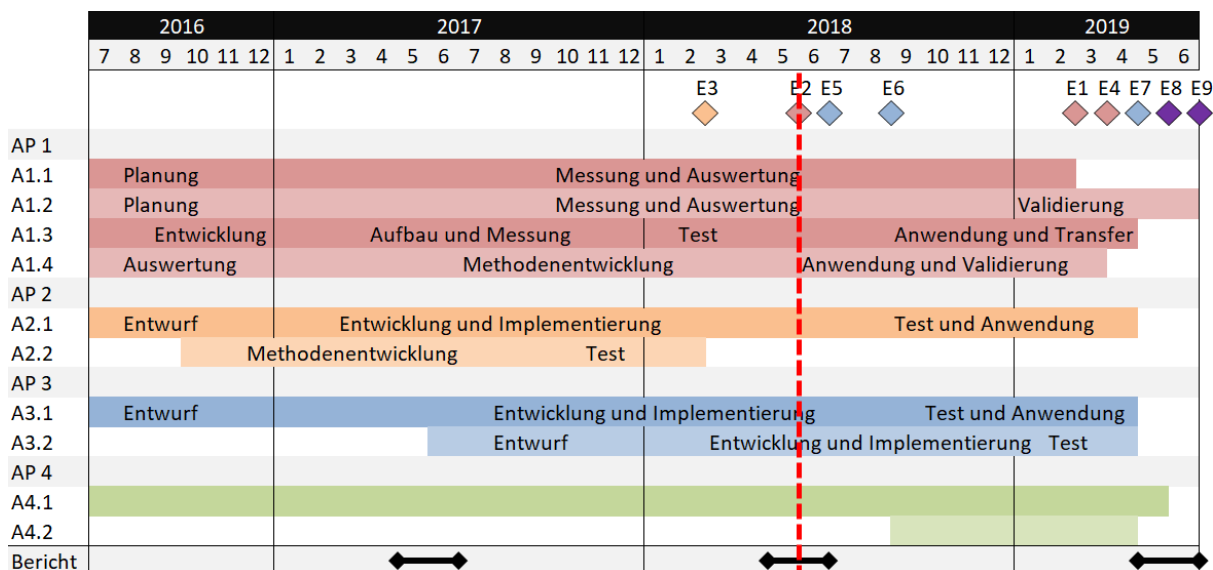


Abbildung 30: Zeitplan und Meilensteine für das EXTRUSO Projekt

3.4. Arbeitspakete

Die Arbeitspakete befassen sich im Wesentlichen mit dem Monitoring und der Analyse von kleinräumigen hydro-meteorologischen Extremereignissen (AP 1), der Entwicklung neuer Methoden zur Vorhersage hydro-meteorologischer Extremereignisse (AP 2) sowie der Entwicklung von Strategien und Methoden für kollaborative Informations- und Frühwarnsysteme (AP 3). Parallel dazu erfolgen die Projektkoordinierung und Qualifizierungsmaßnahmen (AP 4).

Der aktuelle Arbeitsstand des EXTRUSO-Projektes ist in Kapitel 2 ausführlich dargelegt. Dieses Kapitel dient der Beschreibung des Entwicklungsstandes in den einzelnen Arbeitspaketen. Für die jeweiligen Arbeitspakete relevante Arbeiten werden entsprechend referenziert.

AP 1 Monitoring und Analyse von kleinräumigen hydro-meteorologischer Extremereignissen

AP 1.1 Hochaufgelöste Erfassung hydro-meteorologischer Daten

Die Erfassung hydro-meteorologischer Daten umfasst im Wesentlichen die Analyse von Niederschlagsdaten aus Radardaten in Abschnitt 2.1.1, die Messung von hydro-meteorologischen Parametern durch low-cost Sensorik in Abschnitt 2.1.3 sowie die Modellierung der Boden-Vorfeuchte in Abschnitt 2.1.5. Neben der fortschreitenden Modellbildung für die Analyse von Radar- und Bodenfeuchtedaten, sind erste Messungen von Niederschlagsdaten durch low-cost Sensorik durchgeführt und analysiert worden. Weitere Messungen sind für 2018 geplant.

AP 1.2 Multitemporale 3D-Datenerfassung

Die Plattformkonfigurationen und erste Tests für die Datenerfassung mittels UAV und UWW sind in Abschnitt 2.1.4 beschrieben. Dieses Arbeitspaket befindet sich nach Zeitplan

in der Messungs- und Auswertungsphase. Erste Messkampagnen wurden 2017 und in der ersten Hälfte 2018 durchgeführt.

AP 1.3 Entwicklung und Erprobung kamerabasierte Pegel als Ergänzung zu Wasserstands-, Abfluss- und Feuchtemessungen

Die Entwicklung kamerabasierter Pegel ist in Abschnitt 2.1.2 beschrieben. Dem Zeitplan entsprechend sind erste Systeme zur kontinuierlichen Pegelmessung aufgebaut und werden derzeit ausgewertet.

AP 1.4 Auswertung historischer hydro-meteorologischer Extremereignisse

Für die Analyse historischer Hochwasserereignisse dient u.a. der Kalibrierung entwickelter Modelle. Dies spielt z.B. bei der Bodenfeuchtemodellierung in Abschnitt 2.1.5 eine wichtige Rolle. Zudem liegt der Schwerpunkt der Radardatenauswertung in Abschnitt 2.1.1 auf der Auswertung historischer Hochwasserereignisse. Diese wurden anhand von Schwellwerten aus den Messdaten des offiziellen Pegelmessnetzes extrahiert. Für das Einzugsgebiet der Mandau konnten beispielsweise 20 Hochwasserereignisse für einen Zeitraum der letzten 10 Jahre extrahiert werden. Methoden zur Extraktion von Ereignissen in beliebigen Einzugsgebieten werden derzeit untersucht und implementiert.

AP 2 Entwicklung neuer Methoden zur Vorhersage hydro-meteorologische Extremereignisse

AP 2.1 Entwicklungsplattform für Vorhersagemodelle kleinräumiger Extremereignisse

Die Vorhersage und Modellierung kleinräumiger Extremereignisse basiert im Wesentlichen auf der in Abschnitt 2.1.6 beschriebenen konzeptionellen hydrologischen Modellierung. Die Entwicklung der geplanten Bibliothek zur modularen Erstellung von Vorhersagemodellen befindet sich gemäß Zeitplan in der Implementierungs- und Testphase.

AP 2.2 Entwicklung neuer Methoden zur Informationsgewinnung aus mehreren, verteilten Datenquellen

Methoden zur Geodatenfusion sind in Abschnitt 2.1.9 und den darin referenzierten Publikationen beschrieben. Die gegenwärtige Implementierung beinhaltet ein umfangreiches Toolset welches bei Bedarf im geplanten Informationssystem zum Einsatz kommen kann. Dem Zeitplan entsprechend ist dieses Arbeitspaket weitestgehend abgeschlossen.

AP 3 Entwicklung von Strategien und Methoden für kollaborative Informations- und Frühwarnsystemen

AP 3.1 Entwicklung einer kollaborativen Informationsinfrastruktur

Die zu entwickelnde Informationsinfrastruktur setzt auf den in AP 2.2 bereitgestellten Datensätzen und Methoden auf und dient als zentrale Kommunikationsplattform für das EXTRUSO-Projekt. Der gegenwärtige Stand ist in Abschnitt 2.1.8 beschrieben. Dem Zeitplan entsprechend befindet sich die Informationsinfrastruktur in der Entwicklungs- und Implementierungsphase.

AP 3.2 Integration eines Vorhersagesystems für kleinräumige hydro-meteorologische Extremereignisse

Das geplante Vorhersagesystem basiert im Wesentlichen auf der datengetriebenen hydrologischen Modellierung, die in Abschnitt 2.1.7 näher beschrieben ist. Dem Zeitplan entsprechend befindet sich dieses Arbeitspaket in der Entwicklungs- und Implementierungsphase.

AP 4 Validierung, Koordinierung und Qualifizierung

Jeder der Nachwuchswissenschaftler angehalten, regelmäßig geeignete Qualifizierungsmaßnahmen durchzuführen. Bisher im Rahmen des Projektes durchgeführte Qualifikationsmaßnahmen sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Durchgeführte Qualifikationsmaßnahmen im Rahmen des EXTRUSO-Projektes

Name	Qualifikationsmaßnahme	Bereich
Diana Spieler	Vorlesung „Einführung Hydrologische Modelle – hydraulische Grundlagen“ (2x)	Lehre
Diana Spieler	Übung „Hydrologische Modelle“ (2x)	Lehre
Diana Spieler	Summer School „Prediction in ungauged Basins“	Qualifizierung
Diana Spieler	Vorlesung im Institusseminar	Lehre
Diana Spieler	Übung “Watershed Management” – Folgescheitelalgorithmus	Lehre
Diana Spieler	Projektstudium Hydrologie 2018	Lehre
Diana Spieler	Workshop „Networking on Conferences“	Soziale Kompetenz
Diana Spieler	Seminar „Projektantrag schreiben“	Projektmanagement
Thomas Singer	Vorlesung und Übung im Modul „Spezielle Aspekte der Hydrologie“ (2x)	Lehre
Thomas Singer	Übung in „Ingenieurhydrologie“ (2x)	Lehre
Thomas Singer	Vorlesung im Institusseminar (2x)	Lehre
Thomas Singer	Workshop Professionell Projektanträge konzipieren	Projektmanagement
Anette Eltner	Workshop „Körpersprache und unbewusste Botschaften“	Soziale Kompetenz
Anette Eltner	Weiterbildung „Project Management for Academics“	Projektmanagement
Anette Eltner	Weiterbildung „How to become a professor – how to structure your PostDoc“	Soziale Kompetenz
Anette Eltner	Weiterbildung „Leadership skills for PostDocs“	Soziale Kompetenz

Anette Eltner	Übung „Photogrammetrie für Forstwissenschaftler“	Lehre
Anette Eltner	Weiterbildung „Crashkurs Lehre – von der allgemeinen zur fachbezogenen Hochschuldidaktik“	Lehre
Hannes Sardemann	Workshop „Networking on Conferences“	Soziale Kompetenz
Hannes Sardemann	Lehre „Lichtfeldkamera“	Lehre
Hannes Sardemann	Workshop „Wissenschaftliches Schreiben für Promovierende“	Soziale Kompetenz
Hannes Sardemann	Workshop „Logik und Argumentation“	Soziale Kompetenz
Hannes Sardemann	Workshop „Conflict Management for Young Researchers“	Soziale Kompetenz
Hannes Sardemann	Vorlesung und Übung im Modul „Optische 3D Messverfahren“ (2x)	Lehre
Stefan Wiemann	Seminar „Geodateninfrastrukturen“ (2x)	Lehre
Stefan Wiemann	Weiterbildung „Projektmanagement - Grundlagen“	Projektmanagement
Stefan Wiemann	Weiterbildung „Projektmanagement - Aufbaukurs“	Projektmanagement
Robert Krüger	Seminar „Urbane Geosensornetzwerke“	Lehre
Thi Thang Luong	Vorlesung „Climate Change“	Lehre
Thi Thang Luong	Workshop „Research Data Management“	Projektmanagement
Thi Thang Luong	Workshop „Successful Conference Organisation“	Soziale Kompetenz
Thi Thang Luong	Workshop „Project Management for Academies“	Projektmanagement
Thi Thang Luong	Workshop „Academic Presentation with an Impact- Skill Training“	Soziale Kompetenz
Thi Thang Luong	Vorlesung und Übung im Model „Angewandte Meteorologie für Hydrologie-Verdunstung Model“	Lehre
Thi Thang Luong	Workshop „Logik und Argumentation“	Soziale Kompetenz

4. ERGEBNISSE UND DOKUMENTATION

Das EXTRUSO- Projekt befindet sich derzeit in der Implementierungs- und Testphase. Die Dokumentation der in Kapitel 3.4 beschriebenen Arbeitspakete erfolgt parallel zu den durchgeführten Arbeiten durch die jeweiligen Projektteilnehmer. Für interne Absprachen und Diskussionen werden regelmäßig (2-wöchentlich) Projekttreffen durchgeführt. Zudem existiert für den Austausch von Informationen und Daten ein geschütztes Gruppenlaufwerk. Für die Außendarstellung des Projektes wurde eine Homepage aufgesetzt, die unter der Domain <https://extruso.bu.tu-dresden.de> erreichbar ist.

Zur Förderung des wissenschaftlichen Diskurses nehmen alle Projektteilnehmer regelmäßig an nationalen und internationalen Konferenzen teil. Dabei konnten bereits wertvolle Informationen und Kontakte gewonnen werden. Beispiele sind:

- Gewässermorphologisches Kolloquium 2016 in Koblenz
- Oldenburger 3D-Tage 2017
- EGU 2017
- Jahrestagung des AK Hydrologie in Göttingen 2017
- gemeinsames Meeting von IAHS und WMO „Innovation in Hydrometry“ in Genf 2017
- Jahrestagung des AK Geomorphologie in Bayreuth 2017
- Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) 2018 in München
- EGU 2018
- Tag der Hydrologie 2018 in Dresden

Zudem erfolgte ein sehr informatives Treffen mit Prof. Marco Borga, einem der führenden europäischen Wissenschaftler im Bereich der Flash-Flood-Forschung, im Rahmen des Flash-Flood-Workshops im Juni 2017 in Tharandt.

Für die Veröffentlichung der Projektergebnisse im wissenschaftlichen Rahmen ist eine Reihe von Publikationen erfolgt oder geplant. Im Rahmen des EXTRUSO-Projektes publizierte wissenschaftliche Arbeiten sind in Tabelle 3 aufgelistet.

Tabelle 3: Wissenschaftliche Publikationen im Rahmen des EXTRUSO-Projektes

Autor	Titel	Jahr	Publikation
Sardemann	Erste Untersuchungen mit dem Solid-State Laserscanner LeddarTech Vu8	2017	Paper und Vortrag auf Oldenburger 3D-Tagen
Singer et al.	Analysis on the phenomena of phase shift errors of data-driven flood forecasting models	2017	Poster auf EGU
Wiemann et al.	On the monitoring and prediction of flash floods in small and medium-sized catchments – the EXTRUSO project	2017	Poster auf EGU

Luong et al.	Comparative estimation and assessment of initial soil moisture conditions for Flash Flood warning in Saxony	2017	Poster auf EGU
Eltner et al.	Time-lapse photogrammetry in geomorphic studies	2017	Poster auf EGU
Eltner et al.	Camera based low-cost system to monitor hydrological parameters in small catchments	2017	Poster auf EGU
Eltner et al.	4D reconstruction of soil surface changes with time-lapse cameras	2017	PICO auf EGU
Spieler et al.	Effects of model structure and catchment discretization on discharge simulation in a small forest catchment	2017	Poster auf EGU
Wiemann et al.	Ad-hoc combination and analysis of heterogeneous and distributed spatial data for environmental monitoring – design and prototype of a web-based solution	2017	International Journal of Digital Earth
Singer und Schütze	Hochwasservorhersage mit der Neural Network Toolbox	2017	Poster auf Matlab EXPO
Singer und Metzkes	Datengetriebene Hochwasservorhersage: von der regionalen Studie zur detaillierten Fehleranalyse	2018	Poster am Tag der Hydrologie
Singer et al.	Data-driven flood prediction: from regional to detailed analyses	2018	Poster auf EGU
Wiemann et al.	Entwicklung eines Informationssystems zur Analyse und Prädiktion hydro-meteorologischer Extremereignisse in mittleren und kleinen Einzugsgebieten	2018	Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 39.18
Wiemann	Development of an information system for the ad hoc assessment of hydro-meteorological extreme events	2018	Vortrag auf EGU
Wiemann	Application of open hydro-meteorological data for web-based analysis and processing	2018	Paper und Vortrag auf AGILE Konferenz
Sardemann et al.	Erfassung von Geometriedaten kleiner Flüsse mit einem unbemannten Wasserfahrzeug als Multi-sensor-Plattform	2018	Paper und Vortrag auf DGPF Jahrestagung
Eltner et al.	Entwicklung eines low-cost Kamerapegels zur Erfassung hydrologischer Extremereignisse	2018	Paper und Poster auf DGPF Jahrestagung
Eltner et al.	Hydro-geomorphological monitoring of ungauged catchments with photogrammetric methods	2018	Vortrag auf EGU
Eltner et al.	Using thermal imagery as a low-cost approach to measure flow velocity and discharge	2018	PICO auf EGU

Spieler et al.	A Case Study for Testing Automatic Model Structure Identification as a Tool for Identifying Hydrologic Change	2018	Poster auf EGU
Spieler et al.	Optimierung der Modellstruktur als Ansatz zur Analyse hydrologischer Strukturänderungen in einem großflächig gestörten Waldeinzugsgebiet	2018	Poster am Tag der Hydrologie
Krüger	Entwicklung eines Low-Cost Sensor Systems zur Erfassung hydrometeorologischer Extremereignisse	2018	Poster auf PFGK
Krüger et al.	Evaluating Spatial Data Acquisition and Interpolation Strategies for River Bathymetries	2018	Paper und Vortrag auf AGILE Konferenz
Luong et al.	Comparative assessment of evapotranspiration derived from water balance, eddy covariance and the BROOK90 model (Tharandt Forest, Germany)	2018	Poster auf EGU
Luong et al.	Deriving rainfall thresholds based on soil moisture conditions for flash flood warning in a forested catchment using a physical process-based model	2018	Poster am Tag der Hydrologie
Luong et al.	Evaluation of rainfall thresholds for flash flood warning derived from antecedent soil moisture conditions with a physical process-based model: Case study Wernersbach, Germany	2018	Poster auf EGU

5. BEACHTUNG VON GRUNDSÄTZEN/QUERSCHNITTSAUFGABEN

5.1. Beitrag zu den Grundsätzen Umwelt und Ressourcenschutz, Gleichstellung, Chancengleichheit, Nichtdiskriminierung

Das Ziel des EXTRUSO-Projektes ist die Vermittlung umweltrelevanter Qualifikationen an Nachwuchswissenschaftler zur Stärkung und Sicherung eines entsprechenden Fachkräfteangebotes im Freistaat Sachsen. Im Laufe des Projektes ist eine Kollaborationsplattform geplant, die es Bürger/innen ermöglicht, sich über das Projekt allgemein und die Projektergebnisse zu informieren, um somit umweltrelevantes Wissen zu erlangen.

Für die Einstellung von Nachwuchswissenschaftlern im EXTRUSO-Projekt wurde ein strenges Auswahlverfahren anhand wissenschaftlich-fachlicher Kriterien sowie vorhandener Softskills durchgeführt. Zwei der acht Nachwuchsforscher/innen-Stellen konnten mit Frauen besetzt werden (Tabelle 4).

Tabelle 4: Nachwuchsforscher/-innen im EXTRUSO-Projekt

Name	Arbeitspakete	Qualifikation	Fachgebiet
Diana Spieler	2.1 1.1	Dipl.-Hydrol.	Hydrologie
Thomas Singer	3.2 1.4	M.Sc.	Hydrologie
Thi Thang Luong	1.4 2.1	M.Sc.	Meteorologie
Firas Al Janabi	1.1 2.2 3.2	Promotion	Meteorologie
Anette Eltner	1.3 1.2	Promotion	Photogrammetrie
Hannes Sardemann	1.2	M.Sc.	Photogrammetrie
Stefan Wiemann	2.2 4	Promotion	Geoinformatik
Robert Krüger	3.1 1.1	M.Sc.	Geoinformatik

5.2. Umsetzung sozialer Innovation

Eine ausgewogene Work-Life-Balance und die Vereinbarkeit von Beruf und Familie werden allen Projektteilnehmern ermöglicht. Dies umfasst insbesondere flexible Arbeitszeiten sowie die Möglichkeit der Inanspruchnahme von Angeboten der TU Dresden im Bereich der Kinderbetreuung.

5.3. Umsetzung transnationaler Zusammenarbeit

Die Kooperation und Kommunikation mit denen im Projektantrag genannten nationalen und internationalen Einrichtungen ist angestrebt und in Teilen bereits etabliert.