



# Hochwasserfrühwarnung für kleine Einzugsgebiete

Möglichkeiten und Grenzen im Lichte operationeller  
Anforderungen am Beispiel Sachsens





# Hochwasserfrühwarnung für kleine Einzugsgebiete

## Möglichkeiten und Grenzen im Lichte operationeller Anforderungen am Beispiel Sachsens

Endbericht zum Projektvorhaben „Konzeption, Umsetzung sowie Operationalisierung eines Systems zur Ableitung und Bereitstellung von Produkten zur Bewertung und Prognose der regionalen Hochwassergefährdung für kleine Einzugsgebiete in Sachsen“

### **Projektleitung:**

Dr. Andy Philipp (LfULG)

### **Projektmitarbeit:**

MSc Florian Kerl (LfULG);

Prof. Niels Schütze, Dr. Robert Schwarze, Dr. Michael Wagner, Dr. Peter Stange,  
MSc Thomas Singer, MSc Christine Metzkes (alle TU Dresden)



## Kurzzusammenfassung

In den letzten Jahren war der Freistaat Sachsen wiederholt sowohl von großen Flusshochwassern, als auch von kleinräumigen, extremen Abflussereignissen in Folge von Starkregen betroffen. Eine Frühwarnung vor potentiell gefahrträchtigen hydrologischen Situationen in kleinen Einzugsgebieten muss dabei nicht nur hydrologische, sondern auch meteorologische Aspekte sowie Fragen der Kommunikation von Warnungen berücksichtigen. Zur Identifikation der Möglichkeiten und Grenzen einer Hochwasserfrühwarnung für schnell reagierende, kleine Einzugsgebiete wurden daher untersucht: (1) die Ansprüche potentieller Nutzer von Hochwasserfrühwarnprodukten, (2) quantitative Niederschlagsschätzungen und -vorhersageprodukte und (3) verschiedene hydrologische Modellansätze. Ausgehend von diesen Erkenntnissen werden die Möglichkeiten und Grenzen einer Hochwasserfrühwarnung für kleine Einzugsgebiete aufgezeigt und schließlich ein geeigneter Ansatz konzipiert, implementiert und in ein operationelles Hochwasserfrühwarnsystem überführt.

## English Abstract

In recent years, the Free State of Saxony (Eastern Germany) was repeatedly hit by both extensive riverine flooding, as well as flash flood events, emerging foremost from convective heavy rainfall. Especially after a couple of rather small-scale, yet disastrous events in the last years, preconditions, drivers, and methods for deriving flash-flood related early warning products are investigated. This is to clarify the feasibility and the limits of envisaged early warning procedures for small catchments, hit by flashy heavy rain events. Early warning about potentially flash flood prone situations (i.e., with a suitable lead time regarding required reaction-time needs of the stakeholders involved in flood risk management) needs to take into account not only hydrological, but also meteorological, as well as communication issues. Therefore, a threefold methodology is proposed to identify potential benefits and limitations in a real-world warning/reaction context. First, the user demands (with respect to desired/required warning products, preparation times, etc.) are investigated. Second, focusing on small catchments of some hundred square kilometers, quantitative precipitation estimates and forecasts are verified. Third, considering the user needs, as well as the input parameter uncertainty (i.e., foremost emerging from an uncertain QPF), a feasible, yet robust hydrological modeling approach is proposed on the basis of a comparative study, employing deterministic, data-driven, and simple scoring methods. Eventually, this approach is conceptualized, implemented and transferred to an operational flash flood early warning system for Saxony.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>11</b>
<b>I Grundlagen: Herausforderungen bei der Hochwasserfrühwarnung</b>	<b>13</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>14</b>
1.1 Begrifflichkeiten: Kleine Einzugsgebiete, Flash Floods, Pluvial Floods etc. . . . .	16
1.2 Exkurs: Der Risikobegriff . . . . .	17
1.3 Warnung auf Grundlage von Vorhersagen . . . . .	20
1.4 Abflussvorhersage für kleine Einzugsgebiete . . . . .	21
1.5 Kleine, schnell reagierende Einzugsgebiete und Hochwasserfrühwarnung . . . . .	22
1.6 Beispiele operationeller Hochwasserfrühwarnsysteme . . . . .	24
<b>2 Stand der Technik, Methoden, Werkzeuge</b>	<b>32</b>
2.1 Meteorologische Grundlagen und Produkte . . . . .	32
2.2 Systematisierung von hydrologischen Modellansätzen . . . . .	37
2.3 Typisches operationelles Vorhersage-Setup . . . . .	40
2.4 Quantitative Bewertung von Vorhersagen . . . . .	43
2.5 Zu Unsicherheiten und Ensemble-Techniken . . . . .	49
2.6 Zur Vorhersage in unbeobachteten Einzugsgebieten . . . . .	53
2.7 Ableitung und Kommunikation von Warnungen . . . . .	55
<b>3 Der Weg hin zu einem Hochwasserfrühwarnsystem für Sachsen</b>	<b>58</b>
3.1 Abriss historischer sowie rezenter kleinräumiger Hochwasserereignisse . . . . .	58
3.2 Ausgewählte Untersuchungen zur kleinräumigen hydrologischen Modellierung . . . . .	60
3.3 Schlussfolgerungen, Defizite, Synthese . . . . .	62
3.4 Vorstellung des Frühwarnprojekts . . . . .	63
3.5 Der Projektworkshop im November 2015 . . . . .	67
<b>4 Zusammenfassung Teil I</b>	<b>72</b>

<b>II</b>	<b>Pilotstudien: Möglichkeiten und Grenzen bei der Hochwasserfrühwarnung</b>	<b>73</b>
<b>5</b>	<b>Ansprüche potentieller Nutzer eines Hochwasserfrühwarnsystems</b>	<b>74</b>
5.1	Material und Methoden . . . . .	74
5.2	Ergebnisse . . . . .	78
5.3	Kernaussagen . . . . .	87
5.4	Diskussion . . . . .	89
<b>6</b>	<b>Erste Verifikation meteorologischer Antriebsdaten</b>	<b>91</b>
6.1	Gebietsübersicht . . . . .	91
6.2	Untersuchte Produkte . . . . .	93
6.3	Verifikation der Vorhersageprodukte . . . . .	98
6.4	Diskussion . . . . .	108
<b>7</b>	<b>Weiterführende Verifikation meteorologischer Antriebsdaten</b>	<b>112</b>
7.1	Untersuchte Produkte . . . . .	112
7.2	Bildung von Bilanzgebieten und Gewinnung von Vergleichsdaten . . . . .	112
7.3	Verifikation der Vorhersageprodukte . . . . .	115
7.4	Diskussion . . . . .	121
<b>8</b>	<b>Vergleichende Bewertung hydrologischer Modellansätze</b>	<b>126</b>
8.1	Grundlagen und methodisches Vorgehen . . . . .	126
8.2	Ergebnisse der Vergleichsstudie . . . . .	133
8.3	Zur Bewertung der regionalen Gültigkeit/Übertragbarkeit . . . . .	138
8.4	Diskussion . . . . .	141
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung Teil II</b>	<b>144</b>
<b>III</b>	<b>Umsetzung: Ein operationelles Hochwasserfrühwarnsystem für Sachsen</b>	<b>145</b>
<b>10</b>	<b>Schlüsse aus Pilotstudien und Projektworkshop</b>	<b>146</b>
10.1	Nutzerstudie . . . . .	146
10.2	Studien zur Verifikation meteorologischer Antriebsdaten . . . . .	146
10.3	Hydrologische Pilotstudie . . . . .	147
10.4	Fazit . . . . .	147
<b>11</b>	<b>Konzeption und Implementierung eines Hochwasserfrühwarnsystems</b>	<b>149</b>
11.1	Ausgangssituation und Zielsetzung . . . . .	149
11.2	Soll-Modellierung des IT-Systems . . . . .	149
11.3	Fachliche Daten und Datenverarbeitung . . . . .	153
11.4	Diskussion . . . . .	162

<b>12 Das Frühwarnsystem im Betrieb</b>	<b>164</b>
12.1 Systemsetup für den operationellen Betrieb . . . . .	164
12.2 Präsentation von Frühwarninformationen im Internet . . . . .	166
12.3 Verifikation des präoperationellen Prototyps . . . . .	167
12.4 Fallstudien, Einzelereignisse . . . . .	168
12.5 Öffentlichkeitsarbeit . . . . .	184
12.6 Diskussion . . . . .	187
<b>13 Zusammenfassung Teil III</b>	<b>188</b>
<b>IV Ausblick und Gesamtzusammenfassung</b>	<b>189</b>
<b>14 Verbesserungspotential bei der regionalen Hochwasserfrühwarnung</b>	<b>190</b>
14.1 Veröffentlichung und Verteilung von Warnprodukten, Schnittstellen . . . . .	190
14.2 Einbeziehung von Unsicherheiten . . . . .	190
14.3 Einbeziehung von Crowdsourcing-Daten . . . . .	192
14.4 Risikokommunikation, Follow-Up der Nutzerbefragung . . . . .	193
<b>15 Gesamtzusammenfassung</b>	<b>195</b>
<b>V Anhänge</b>	<b>197</b>
Liste der projektbezogenen Veröffentlichungen und Vorträge	198
Liste der Schlussfolgerungen	200
Literaturverzeichnis	205
Abbildungsverzeichnis	215
Tabellenverzeichnis	219
Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	221
Stichwortverzeichnis	225



## Vorwort

Im Frühjahr und Frühsommer 2016 kam es in Deutschland zu einer Reihe verheerender Sturzflutereignisse in Folge von Starkregen. Intensive Niederschläge, welche nur wenige Stunden andauerten, führten zu massiven Schäden an Gebäuden, Infrastruktur und bedauerlicherweise auch an Leib und Leben. Die Bilder aus Braunsbach und Simbach werden wohl für längere Zeit im kollektiven Gedächtnis bleiben. Auch in Sachsen sind solche Ereignisse im Bereich des Möglichen; in der Vergangenheit war der Freistaat zwar hauptsächlich von großräumigen Flusshochwassern, wie 2002 oder 2013 betroffen, aber auch kleinräumige Hochwasser in Folge lokaler Starkregen verursachten hier bisweilen beträchtliche Schäden. Als besonders prägende Ereignisse seien die zerstörerischen Sturzfluten von 1999 in Marienberg und 1927 im Müglitz- und Gottleubagebiet genannt. Auch in jüngster Vergangenheit traten schadbringende Ereignisse auf, wie 2014 in Meißen oder 2017 in Spitzkunnersdorf in der Oberlausitz.

Da grundsätzlich an jedem Ort Deutschlands eine Gefahr durch Starkregen existiert, ist das von Sturzfluten ausgehende Risiko notorisch unterschätzt. Solche Sturzflutereignisse sind zuvorderst niederschlagsgetrieben und nicht unbedingt gewässergebunden. Daher ist in diesen Fällen eine auf Pegelbeobachtungen basierende Hochwasserwarnung – wie bislang in Sachsen praktiziert – nicht beliebig nützlich. Es ist vielmehr sinnvoll, das im Freistaat bestehende pegelbasierte Hochwasserwarnsystem zu ergänzen, um zusätzlich vor kleinräumigen, durch Starkregen ausgelösten Hochwasserereignissen warnen zu können. Da die Zeit zwischen Niederschlag und schadbringendem Abfluss zu kurz für eine beobachtungs-basierte Warnung wäre, müssen Niederschlagsvorhersagen einbezogen werden; so gelangt man zu einer *Frühwarnung* vor Hochwasser.

Das hierin beschriebene Projekt untersuchte die Möglichkeiten und – mit Blick auf Unsicherheiten bei der Niederschlagsvorhersage – die Grenzen der Frühwarnung vor durch Starkregen hervorgerufenen Hochwasserereignissen. Weiterhin wurden die Ansprüche und Erwartungen potentieller Nutzer von Frühwarnprodukten erhoben. In der Zusammenschau der gewonnenen Erkenntnisse wurde schließlich ein sächsisches Hochwasserfrühwarnsystem konzipiert, erstellt und in den laufenden Betrieb überführt, dessen Mehrwert bereits nach kurzer Zeit nachweisbar war.



A handwritten signature in black ink, appearing to read 'N. Eichkorn'.

**Norbert Eichkorn**  
Präsident des LfULG



## **Teil I**

# **Grundlagen: Herausforderungen bei der Hochwasserfrühwarnung für kleine, schnell reagierende Einzugsgebiete**

# 1 Einleitung

Sachsen war in den vergangenen Jahren von mehreren bedeutenden Hochwasserereignissen betroffen (siehe Abb. 1.0.1). Die sowohl aus hydrologischer Sicht, als auch gemessen an den verursachten Schäden stärksten Ereignisse liefen dabei im August 2002, August 2010 sowie im Juni 2013 ab (LFUG, 2004; LFULG, 2009; MÜLLER & WALTHER, 2011; LFULG, 2013a,b, 2015).<sup>1</sup> Die durch diese drei Hochwasser hervorgerufenen Gesamtschäden beliefen sich dabei auf rund 9 Milliarden Euro (davon 6,1 Mrd. in 2002, 0,85 Mrd. in 2010 und ca. 2 Mrd. in 2013).

Mit insgesamt rund 300 Messstellen unterhält der Freistaat Sachsen das dichteste Pegelmessnetz in Deutschland. Gestützt auf derzeit 105 Hochwassermeldepegel ist eine raum-zeitlich hoch aufgelöste Überwachung der Wasserführung möglich. Über Meldewege wie SMS, Fax, Videotext, Rundfunk und das Internet sind eine akkurate und schnelle Warnung und Information von Bevölkerung, Behörden und Unternehmen möglich. Für die sächsischen Hauptflussgebiete<sup>2</sup> sind deterministische hydrologische Vorhersagen auf Basis von Niederschlags-Abfluss-Modellen und Wellenablaufmodellen verfügbar, welche vom Landeshochwasserzentrum (LHWZ) erstellt und ereignisbezogen weitergegeben werden. Für Einzugsgebiete größer 1.000 km<sup>2</sup> sind damit Vorhersagen mit bis zu zwei Tagen Vorhersagezeitraum zu realisieren; für den Elbstrom sind verlässliche Vorhersagen mit bis zu drei Tagen Vorhersagezeitraum möglich.

Wie schon beim „Jahrhunderthochwasser“ 2002 durch KIRCHBACH ET AL. (2002), kam es nach dem bedeutenden und teilweise extremen Hochwasser im August 2010 (siehe Abb. 1.0.1) abermals zu einer Untersuchung des Hochwassernachrichten- und -meldewesens durch eine vom Sächsischen Innenministerium eingesetzte Kommission, der sogenannten „Jeschke-Kommission“. Der von der Kommission vorgelegte Bericht (JESCHKE ET AL., 2010) geht dabei unter anderem auf Aspekte der frühzeitigen

Warnung von potentiell durch Hochwasser Betroffenen ein. Im Bericht wird dazu ein Frühwarnsystem gefordert, welches „den bisherigen Hochwassernachrichten- und Alarmdienst (...) ergänzt und auf (...) Sturzregen reagiert“. Das Juni-Hochwasser 2013 gab der Forderung nach einem Hochwasserfrühwarnsystem (HWFWS) erneut starken Nachdruck, was bereits in einem aktuellen Kommissionsbericht zum Ereignismanagement fixiert wurde (KIRCHBACH ET AL., 2013).

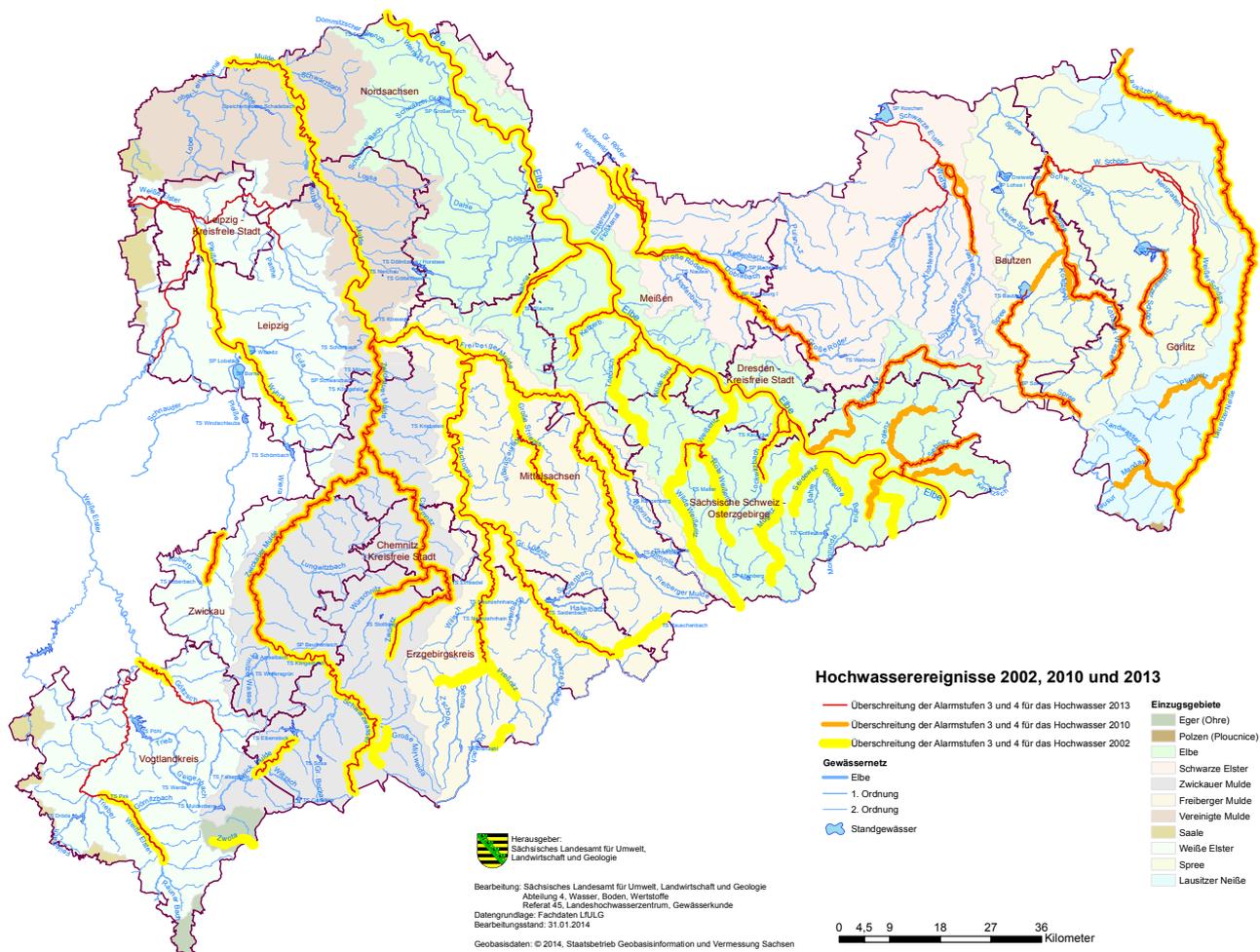
Der Begriff „Hochwasserfrühwarnsystem“ ist jedoch nicht klar definiert, wie beispielsweise KUNDZEWICZ (2013) ausführt. Generell soll solch ein System jederzeit und kontinuierlich die Möglichkeit bieten, frühzeitig Warnungen an potentiell Betroffene zu verteilen und eventuell auch deren Reaktion auf die Warnungen entgegennehmen, z. B. um bei Nichtreaktion den gewarnten Personenkreis zu erweitern (sog. „Eskalation“). Für die Bewertung der Warnlage können unterschiedliche Konzepte zum Einsatz kommen. So ist es beispielsweise denkbar, lediglich *Beobachtungen* von Niederschlag und Wasserstand bzw. Durchfluss in die Erstellung einer Frühwarnung mit einzubeziehen. Auf der anderen Seite wird – insofern eine gewisse Vorwarnzeit beabsichtigt ist und/oder die Warnung für kleine Einzugsgebiete (wie in JESCHKE ET AL., 2010 gefordert) erstellt werden soll – eine *Vorhersage* von Wasserstand und Abfluss die Basis der Frühwarnung bilden müssen (siehe dazu auch Abschnitt 1.4).

Ist für die Ableitung der Warnlage für kleine Einzugsgebieten eine Abflussvorhersage nötig, muss eine – wie auch immer geartete – Niederschlags-Abfluss-(N-A)-Modellierung<sup>3</sup> durchgeführt werden. Allerdings ist es in den hydrologischen Wissenschaften generell anerkannt,

<sup>1</sup>Weitere bedeutende Hochwasserereignisse traten seit 2002 in den Wintern 2006 und 2011 auf.

<sup>2</sup>Weißer Elster, Mulde, Elbe und Nebenflüsse, Schwarze Elster, Spree, Lausitzer Neiße.

<sup>3</sup>Der Begriff N-A-Modellierung soll hier im weiteren Sinne verstanden werden, also alle (abstrakten) Modelle umfassen, die die Niederschlags-Abfluss-Beziehung beschreiben. Damit ist nicht nur die typische, mechanistische Herangehensweise bei der deterministischen Modellierung abgedeckt, sondern auch (einfachste) empirische/statistische Modelle, wie Abflussbeiwertverfahren, Regressionsverfahren und so weiter.



**Abbildung 1.0.1:** Gebietskulisse der Hochwassereignisse 2002 (gelb), 2010 (orange) und 2013 (rot) in Sachsen. In den farbig markierten Gewässerabschnitten kam es zu einer Überschreitung des Richtwertes der höchsten Alarmstufen 3 bzw. 4, vorgegeben durch die Sächsische Hochwassermeldeordnung (HWMO, 2015).

dass eine N-A-Modellierung für kleine Einzugsgebiete<sup>1</sup> im gegliederten Gelände mit erheblichen Unsicherheiten behaftet sein wird (BEVEN, 2012). So ist bereits die Erfassung von kleinräumigen und intensiven Niederschlagsereignissen („Sturzregen“) oftmals nur durch Einbeziehung von Radar-Messungen möglich. Diese müssen aber ihrerseits an punktuellen Ombrometermessungen angeeicht werden, welche aufgrund der begrenzten Stationsdichte für kleine Einzugsgebiete nicht repräsentativ sind (KNEIS & HEISTERMANN, 2009).

Ein weiteres Problem bei der N-A-Modellierung für kleine Einzugsgebiete ist, dass oftmals keinerlei Pegelbeobachtungen vorhanden sind, mit deren Hilfe die bei

der Modellierung benötigten effektiven Parameter adäquat geschätzt werden könnten. Parameter werden daher im Sinne einer Regionalisierung oftmals von benachbarten, beobachteten Einzugsgebieten übertragen, was weitere Unsicherheiten in die Modellierung einbringt (POMEROY ET AL., 2013). Generell ist aus diesen Gründen die Betrachtung von Unsicherheiten bei der N-A-Modellierung kleiner Einzugsgebiete von großer Bedeutung (GRUNDMANN, 2010).

Auf der anderen Seite stellen auch Ansprüche an Genauigkeit, Robustheit, Vorhersagezeitraum und Art der gewünschten Modellaussage Kriterien für Wahl, Aufbau und Betrieb eines geeigneten N-A-Modells dar. Eine zeitlich und räumlich differenzierte Vorhersage von Durchflussganglinien erfordert demnach eine ganz andere methodische Herangehensweise, als wenn lediglich für ein bestimmtes

<sup>1</sup> Kleine Einzugsgebiete meint Gebiete, in denen die Prozesse der Abflussbildung und Abflusskonzentration dominieren. Im sächsischen Festgesteinsbereich betrifft das Einzugsgebiete mit einer Fläche von typischerweise weniger als 200 Quadratkilometern.

Gebiet eine klassifizierte und verbale Einschätzung der Hochwassergefährdung gewünscht ist.

Die hier angesprochenen Punkte deuten bereits darauf hin, dass neben Aspekten auf der Modellierseite (z. B. Verfügbarkeit und Qualität meteorologischer und hydrologischer Daten, erzielbarer Vorhersagezeitraum, Einzugsgebietsgröße, Art und Weise der Verarbeitung von Unsicherheiten) auch die Seite der Nutzer der Modellergebnisse (z. B. Interpretierbarkeit von Unsicherheiten, gewünschter Vorhersagezeitraum, räumlicher Bezug der Warnung) Einfluss auf die verfolgte Philosophie bei der N-A-Modellierung hat. In diesem Lichte sollte auch der Gefahr begegnet werden, dass „der technologische Fortschritt bei der Vorhersageerstellung zu schnell ist, als dass die Endnutzer von diesem Fortschritt profitieren könnten“ (MCCARTHY, 2007). Im Umkehrschluss kann und wird es auch stets Diskrepanzen zwischen den Anforderungen von Nutzern und dem fachlich Machbaren geben, welche frühzeitig identifiziert und kommuniziert werden sollten.

**Schlussfolgerung 1:** Für Sachsen gilt, dass extreme Hochwasserereignisse sowohl im Winter/Frühjahr als auch im Sommerhalbjahr auftreten können. Im Sommerhalbjahr sind neben den durch großräumigen, skalierten Niederschlag verursachten Ereignissen, auch durch konvektiven Starkregen hervorgerufene Sturzfluten relevant. ❖

## 1.1 Begrifflichkeiten: Kleine Einzugsgebiete, Flash Floods, Pluvial Floods etc.

Da es oftmals unterschiedliche Definitionen und Sichtweisen auf bestimmte Begriffe gibt, soll nun die Verwendung wichtiger Begriffe innerhalb dieses Textes geklärt werden. Unter *kleinen und schnell reagierenden Einzugsgebieten* sollen natürliche<sup>1</sup> Gewässereinzugsgebiete im Größenbereich zwischen 25 und 200 km<sup>2</sup> – wo Abflussbildung und -konzentration dominant sind – mit typischen Scheitelanstiegszeiten bei Hochwasser von kleiner sechs Stunden verstanden werden (siehe auch die Ausführungen in Abschnitt 1.5). Die *Scheitelanstiegszeit* ist die Zeitspanne zwischen einer ersten, signifikanten Abflusserhöhung bis zum Zeitpunkt des Scheiteldurchgangs. Solche Ereignisse

<sup>1</sup>Hierbei sind stark versiegelte Bereiche (Stadtgebiete, Gewerbegebiete etc.) ausgenommen.

– vorausgesetzt, sie führen zu Überschwemmungen bzw. Überflutungen – sollen hierin als *Flash Floods* (oder Sturzfluten) bezeichnet werden. UCAR (2010) fasst – bezogen auf niederschlagsgetriebene<sup>2</sup> Flash Floods – die wichtigsten Charakteristika solcher Ereignisse wie folgt zusammen:

- Kombination von hohen Niederschlagsintensitäten und betonter Abflussbildung;
- Einfluss des Bodens bei der Abflussbildung; Einfluss der Bodeneigenschaften auf die Bildung von Infiltrations- und/oder Sättigungsüberschuss;
- Modifikation des Ereignisses durch die Wirkung der Abflusskonzentration, welche wiederum von einer Reihe von Faktoren (beispielsweise der Morphologie, Landnutzung, Topologie von Fließwegen etc.) abhängig ist.

Von der Scheitelanstiegszeit zu unterscheiden ist der Begriff der *Konzentrationszeit*; damit wird die Zeitspanne zwischen Beginn des abflusswirksamen Niederschlags bis zum Zeitpunkt, an dem der Direktabfluss aus allen Teilgebieten des betrachteten Einzugsgebiets den Gebietsauslass erreicht hat, bezeichnet. Die Zeitspanne zwischen dem Beginn des Niederschlags und einer ersten, signifikanten hydrologischen Reaktion am Gebietsauslass wird als *Reaktionszeit* bezeichnet; sie wird maßgeblich von den zu Beginn eines Niederschlagsereignisses auftretenden Verlusten durch Interzeption oder Muldenrückhalt (Abflussbildung) sowie der Dynamik der Abflusskonzentration (Oberflächenabfluss, Zwischenabfluss) bestimmt. Reaktions- und Konzentrationszeit sind nicht notwendigerweise gleich.

Das klassische Konzept für die Transformation von Niederschlag in Abfluss (durch Abflussbildung, Abflusskonzentration und Wellenablauf im Gerinne) setzt ein mehr oder weniger ausgeprägtes Netz von Fließwegen und Gewässern voraus, welches das Einzugsgebiet entwässert. In Folge starker Niederschläge kommt es zum Anstieg des Abflusses im Gewässer, schließlich zur Ausuferung und *Überschwemmung* angrenzender Bereiche; man spricht von einem *Flusshochwasser* (oder *Fluvial Flood*). Allerdings kann es auch durch Infiltrationsüberschuss (oder

<sup>2</sup>Die Abgrenzung erfolgt hier gegenüber Ereignissen mit anderer Ursache, beispielsweise in Folge des Versagens von Stauanlagen, Hangrutschungen, Bergstürzen, Ausbrüchen von Gletscherseen etc.

Infiltration Excess Runoff<sup>1</sup> – Regenintensität größer Infiltrationsleistung der Oberfläche) oder Sättigungsüberschuss (Saturation Excess Runoff – Bodenmatrix gesättigt, Infiltration limitiert) zu betontem Direktabfluss auf der Oberfläche kommen (sog. *wild abfließendes Wasser*), welcher u. a. zu *Überflutung* und eventuell zu Erosion führen kann. Im Englischen wird hierfür der Begriff *Pluvial Flood* benutzt.

Die Begriffe Überflutung und Überschwemmung sind im hydrologischen Sinne eigentlich synonym und bezeichnen den Zustand, dass normalerweise trockene Bereiche der Landoberfläche zeitweise mit einer geschlossenen Wasserfläche bedeckt sind. Allerdings ist der Begriff Überschwemmung ein definierter Rechtsbegriff und meint eine Überflutung eines Teils der Landoberfläche, auf dem sich eine versicherte Sache befindet (Haus, Auto). Hier soll „Überschwemmung“ für Hochwasser „aus dem Gewässer heraus“ und „Überflutung“ für Prozesse des Überstaus und Oberflächenabflusses in Folge von Infiltrations- oder Sättigungsüberschuss verwendet werden.

Eine *Warnung* ist zunächst die Information über ein möglicherweise bevorstehendes, schadensträchtiges Ereignis. Eine Warnung intendiert eine gewisse Aktion, welche geeignet ist, das Ereignis abzuwehren oder zumindest dessen Folgen abzumildern. Eine Warnung hat stets einen Adressaten und lenkt dessen Aufmerksamkeit auf eine bevorstehende Gefährdung (zum Begriff „Gefährdung“ siehe Abschnitt 1.2). Eine dem Adressaten überbrachte Information, welche eine Warnung aufhebt, wird als *Entwarnung* bezeichnet.

Mit Blick auf verschiedene „Frühwarnsysteme“ unterschiedlichster Philosophie, scheint es an dieser Stelle mehr als zweckmäßig, eine klare Trennung zwischen *Warnung* und *Frühwarnung* vorzunehmen. Von „Hochwasserfrühwarnung“ soll dann gesprochen werden, wenn einem entsprechenden Warnprodukt eine hydrologische und/oder hydro-meteorologische *Vorhersage* zugrunde liegt. Weiterhin soll als Frühwarnung gelten, wenn auf Basis *meteorologischer* Beobachtungen eine Warnung erfolgt (wobei sich vom meteorologischen Antrieb auf die hydrologische Reaktion nicht beliebig weit in die Zukunft schließen lässt; siehe Abschnitt 1.4). Werden hingegen Wasserstands- bzw. Durchflussbeobachtungen einem Warnprodukt zugrunde gelegt, wird von einer „Hochwasserwarnung“ gesprochen.

Vorhersagen werden zu einem bestimmten Zeitpunkt erstellt, dem *Erstellungszeitpunkt*. Dabei wird ein bestimmter Anfangszustand berücksichtigt und zeitlich in die Zukunft extrapoliert<sup>2</sup> (z. B. mithilfe eines Vorhersagemodells). Der Zeitpunkt des Anfangszustands der Vorhersage wird als *Vorhersagezeitpunkt* bezeichnet. Der von der Vorhersage abgedeckte Zeitbereich ist der *Vorhersagezeitraum* (oder *Vorhersagehorizont*); Erstellungszeitpunkt und Vorhersagezeitpunkt müssen nicht notwendigerweise zusammenfallen. Die Vorhersage kann den Vorhersagezeitraum mit einer Anzahl diskreter Vorhersagen abdecken (z. B. Vorhersage für in einer Stunde, in zwei Stunden usw.); die Länge dieser diskreten Einzelvorhersagen ist die sog. *Vorhersageweite* oder *Lead Time*.

Werden eine oder mehrere Vorhersagen einer automatischen oder auch händischen Bewertung oder Einordnung zugeführt, so entsteht etwas, was des Weiteren als *Prognose*<sup>3</sup> bezeichnet werden soll. Beispielsweise werden im Sinne der Hochwasserfrühwarnung oftmals Vorhersagen aus der hydrologischen Modellierung als Grundlage für die Ableitung einer Aussage (eben der Prognose) über eine zu erwartende Gefährdungslage verwendet (siehe dazu auch Abschnitt 1.3).

**Schlussfolgerung 2:** *Niederschlagsgetriebene Sturzfluten sind Ereignisse, welche durch eine sehr kurze Zeitdifferenz zwischen Niederschlagsbeginn und beginnendem Abflussanstieg sowie Scheitelanstiegszeiten von weniger als sechs Stunden charakterisiert sind. Sie betreffen vor allem kleine Einzugsgebiete. Ihre Hauptursache ist das lokale Auftreten großer Niederschlagsmengen in kurzer Zeit.* ❖

## 1.2 Exkurs: Der Risikobegriff

Obwohl das Projektvorhaben die Risikothematik nur mittelbar berührt, soll an dieser Stelle der Risikobegriff erläutert werden. Es wird hierbei bewusst auf die Aneinanderreihung von Definitionen verzichtet, sondern vielmehr die logische Verbindung der Begrifflichkeiten hervorgehoben. Zunächst

<sup>2</sup>Im mathematischen Sinne handelt es sich bei einer Vorhersage stets um ein Anfangswertproblem; ist die Vorhersage beispielsweise in andere Vorhersagen eingebettet (anschaulich Wettervorhersage für Mitteleuropa in eine weitere, globale Wettervorhersage; hydrologische Vorhersage, angetrieben durch eine Niederschlagsvorhersage), so handelt es sich um ein Anfangs-Randwertproblem.

<sup>3</sup>Obschon oftmals „Vorhersage“ und „Prognose“ im allgemeinen Sprachgebrauch synonym verwendet werden.

<sup>1</sup>Ein anderer Begriff hierfür ist – nach Robert E. Horton – Horton'scher Oberflächenabfluss (siehe dazu auch BEVEN, 2004).



**Abbildung 1.2.1:** Die Verbindung zwischen Gefahr, Vulnerabilität und Risiko.



**Abbildung 1.2.2:** Modell der Einflussfaktoren des Risikos („Risikolemente“) nach RENN (2008).

sei vorangestellt, dass mit dem Risikokzept der Versuch unternommen wird, die Brücke zwischen Natur- und Gesellschaftssystem oder auch zwischen Gefahr und Schadenspotential zu schlagen. Eine *Gefahr* ist zunächst ein Naturprozess, dessen Prozessraum sich in seiner raumzeitlichen Ausdehnung mit dem menschlichen Wirkungsraum überschneidet und dort potentiell zu Schäden führen kann. Die Gefahr selbst wird durch ihre Intensität (Magnitude) und ihr Wiederkehrintervall ( $\text{Frequenz}^{-1}$ ) beschrieben (siehe Abbildung 1.2.1, linke Seite).

Im Falle eines Flusshochwassers ergibt sich die Gefahr beispielsweise für einen überschwemmten Stadtteil mit entsprechenden Wassertiefen (Magnitude) bei einem Hochwasserscheiteldurchfluss eines bestimmten Wiederkehrintervalls (zum Beispiel  $T = 100$ ). Das bedeutet zugleich, dass sich die Gefahr nur mit Änderung der sogenannten Frequenz-Magnituden-Beziehung des Naturprozesses ändert. Zeitlich variant hingegen ist die *Gefährdung*, die die Wahrscheinlichkeit ausdrückt, mit welcher eine Gefahr eintritt. Im Kontext eines Frühwarnsystems muss folglich von der Hochwassergefährdung gesprochen werden. Die zugrunde liegende Eintrittswahrscheinlichkeit eines warnwürdigen Ereignisses wird in diesem Fall beispielsweise anhand von Niederschlagsbeobachtungen und/oder -vorhersagen abgeleitet (siehe dazu auch Abschnitte 1.1 und 2.1).

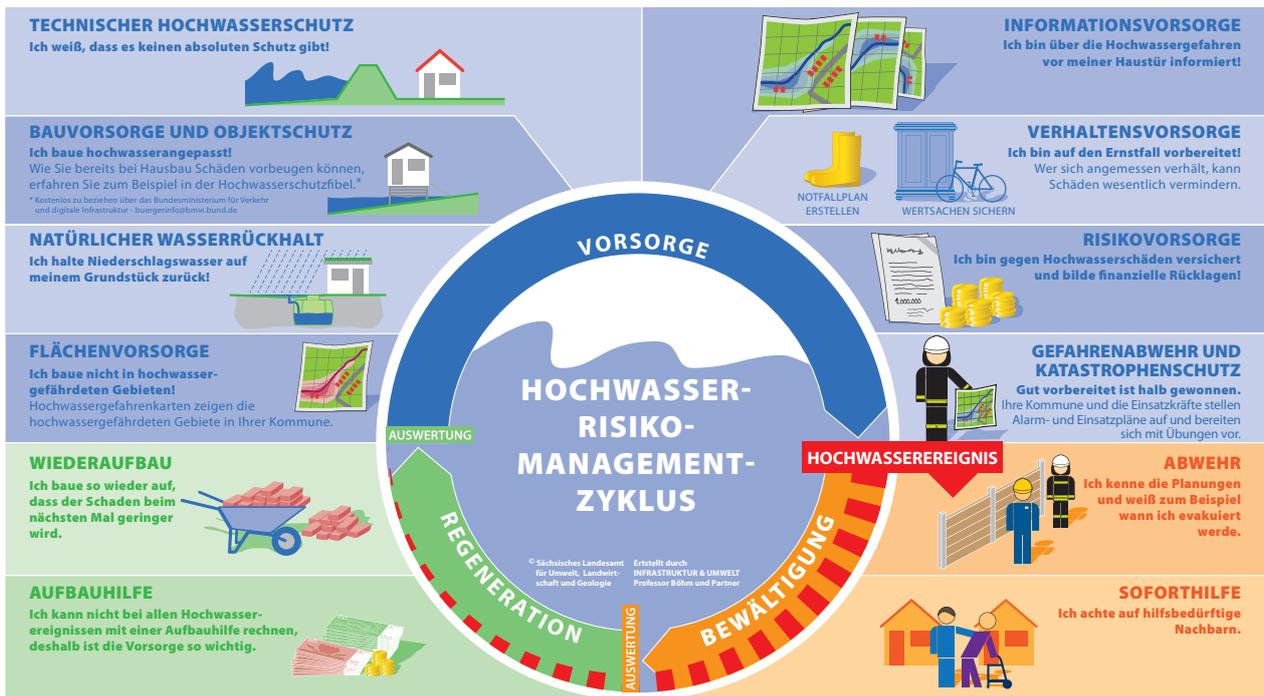
Das *Schadenspotential* spiegelt die Verletzlichkeit des Gesellschaftssystems wider. Ein weiterer, in diesem Zusammenhang verwendeter Begriff ist die *Vulnerabilität*. Die-

se ist nach WISNER ET AL. (2004) ein Maß der Unfähigkeit einer Person oder Gesellschaft, die Auswirkungen eines Naturereignisses zu bewältigen beziehungsweise sich von diesen zu erholen. Die Vulnerabilität ist folglich von der Exposition einer Person oder der Gesellschaft gegenüber einer Gefahr sowie ihrer Widerstandsfähigkeit („Resilienz“) abhängig (siehe Abbildung 1.2.1, rechte Seite). Das Schadenspotential wird teilweise als Element der Vulnerabilität definiert, teilweise aber auch als eigenständiger Einflussfaktor des Risikos angesehen (gemäß Abbildung 1.2.2).

In den Natur- und Sozialwissenschaften existiert eine Vielzahl von Vulnerabilitätskonzepten bzw. Schadenskonzepten, welche unter anderem von BOHLE & GLADE (2007) überblicksmäßig vorgestellt werden. Auf die Hochwasserthematik bezogen wird das Schadenspotential zum Beispiel zur Ermittlung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses für Hochwasserschutzmaßnahmen dem zu erwartenden Gesamtschaden gleichgesetzt. Dieser wird anhand der überschwemmten Fläche, deren Flächennutzung und auf Basis von *Schadensfunktionen* ermittelt (MÜLLER, 2010). Die Kritik an einer derartigen Herangehensweise adressiert die fehlende Berücksichtigung von nicht messbaren – sogenannten intangiblen – Auswirkungen und den ausschließlichen Fokus auf den monetären Schaden selbst. Hierbei wird die Widerstandsfähigkeit (Resilienz) der betroffenen Bürger vollkommen außer Acht gelassen und das Schadenspotential lediglich auf Sachwerte reduziert.

Das *Risiko* ist schließlich, stark vereinfacht, das Bindeglied zwischen der Gefahr und dem Schadenspotential beziehungsweise der Vulnerabilität (siehe Abbildung 1.2.2). Nach RENN (2008) wird dann von Risiko gesprochen, wenn von einer Gefahr die Möglichkeit ausgeht, Schaden zu verursachen. Es bedarf demzufolge einer raumzeitlichen Verschneidung von Gefahrenprozess und den in Abbildung 1.2.2 dargestellten Risikolementen. Eine Übersicht zu weiteren Risikokonzepten der Natur- Sozial- und Geisteswissenschaften findet sich u. a. bei RENN (2008) oder AVEN & RENN (2010).

Als *Risikomanagement* (siehe Abbildung 1.2.3) ist die Steuerung des Risikos zu verstehen und hat nach dem hier vorgestellten Prinzip zwei Ansatzpunkte. Zur Verminderung des Risikos können der Prozess selbst oder aber die Vulnerabilität bzw. die Schadenspotentiale beeinflusst werden (Risikolemente Gefahr und Gefährdung, Schadenspotentiale sowie Vulnerabilität; siehe Abbildung 1.2.2). Im Falle eines Hochwassers lässt sich ausschließlich die Gefahr über deren Magnitude – beispielsweise durch die Errichtung von



**Abbildung 1.2.3:** Hochwasserrisikozyklus mit auf die Risikoelemente Gefahr und Gefährdung, Schadenspotentiale sowie Vulnerabilität abzielenden Maßnahmen. Ergebnisprodukt des Projekts STRIMA (Sächsisch-Tschechisches Hochwasserrisiko-Management), bezogen von <http://strima-ziel3.eu/ergebnisse/> am 18.01.2017.

**Tabelle 1.2.1:** Einfluss bestimmter Maßnahmen des Hochwasserrisiko-Management auf die Risikoelemente Gefahr und Gefährdung, Schadenspotentiale sowie Vulnerabilität.

		Gefahr und Gefährdung	Schadenspotentiale	Vulnerabilität
Vorsorge	Technischer Hochwasserschutz	✓	–	–
	Bauvorsorge und Objektschutz	–	✓	–
	Natürlicher Wasserrückhalt	✓	–	–
	Flächenvorsorge	✓	–	–
	Informationsvorsorge	–	–	✓
	Verhaltensvorsorge	–	–	✓
	Risikovorsorge	–	–	✓
	Gefahrenabwehr und Kat.-Schutz	–	–	✓
Bewältigung	Hochwasserabwehr	✓	–	–
	Soforthilfe	–	–	✓
Regeneration	Wiederaufbau	–	✓	✓
	Aufbauhilfe	–	✓	✓

Hochwasserschutzanlagen – reduzieren. Die Vulnerabilität der betroffenen Einwohner hingegen kann wiederum durch Informationen zu Selbstschutzmaßnahmen gemindert werden, wobei eine Frühwarnung zur rechtzeitigen Umsetzung von Schutzmaßnahmen beiträgt (Verhaltens- bzw. Informationsvorsorge oder „Preparedness“; siehe u. a. GIRONS LOPEZ ET AL., 2016). Schadenspotentiale können beispielsweise durch Maßnahmen der Bauvorsorge verringert werden. Der Einfluss bestimmter Maßnahmen des

Hochwasserrisiko-Management aus Abbildung 1.2.3 auf die Risikoelemente Gefahr und Gefährdung, Schadenspotentiale sowie Vulnerabilität ist Tabelle 1.2.1 zu entnehmen.

**Schlussfolgerung 3:** Innerhalb eines prototypischen Hochwasserrisiko-Managementkonzepts kommt einer Hochwasserfrühwarnung durch die Möglichkeit der Verringerung der Vulnerabilität eine potentiell risikomindernde Rolle zu. ❖

### 1.3 Warnung auf Grundlage von Vorhersagen

Der Begriff Hochwasserwarnung wird im Kontext des Hochwasserrisikomanagements nicht immer gleichsinnig verwendet; in Sachsen meint „Hochwasserwarnung“ gemäß der Hochwassernachrichten- und Alarmdienstverordnung (HWNADO, 2015) sowie Hochwassermeldeordnung (HWMO, 2015)<sup>1</sup> ein bestimmtes, spezifisches Produkt, welches durch das LHWZ erstellt und verteilt wird, seinem Charakter nach allerdings eher als Hochwasserbericht zu bezeichnen wäre. „Hochwasserwarnung“ soll hier jedoch weiter gefasst verwendet werden und zwar in dem Sinne, dass damit alle Informationen und behördlichen Aktivitäten gemeint sind, welche den Akteuren eine qualifizierte Einschätzung der aktuellen sowie der zu erwartenden Hochwassergefährdung bereitstellen. In Sachsen wird dieser Bereich hoheitlicher Aufgaben auch als „Hochwassernachrichten- und Alarmdienst“ bezeichnet.

Durch diese recht allgemeine Definition des Charakters einer Hochwasserwarnung ergeben sich potentiell verschiedene Möglichkeiten, zu solch einer Warnung zu gelangen. Im denkbar einfachsten Falle beruht die Warnung lediglich auf der Bewertung der beobachteten bzw. aktuellen Entwicklung hydrologisch relevanter Parameter, wie Niederschlag oder Abfluss. So wird vielfach (beispielsweise in allen Bundesländern Deutschlands) pegelbasiert gewarnt; wird an einem Pegel, welcher zur Erfüllung dieser Aufgabe betrieben wird (in Sachsen sog. „Hochwassermeldepegel“) ein definierter Richtwert erreicht oder überschritten, zieht das gewisse Konsequenzen nach sich. In Sachsen beispielsweise führt das Erreichen/Überschreiten solch eines definierten Richtwertes zu (a) dem Versand einer sog. „Hochwassereilbenachrichtigung“ (dem Grunde nach eine Hochwasserwarnung!) an die offiziellen Teilnehmer des Hochwassernachrichten- und Alarmdienstes sowie (b) der Möglichkeit des Ausrufens einer mit dem o. g. Richtwert korrespondierenden sog. „Alarmstufe“ durch die Unteren Wasserbehörden. Erst durch letzteren Schritt wird die verteilte Warnung sozusagen amtlich verbindlich für die Akteure vor Ort.

Aber eine Hochwasserwarnung muss nicht zwangsläufig auf Messwerten/Beobachtungen basieren, sondern

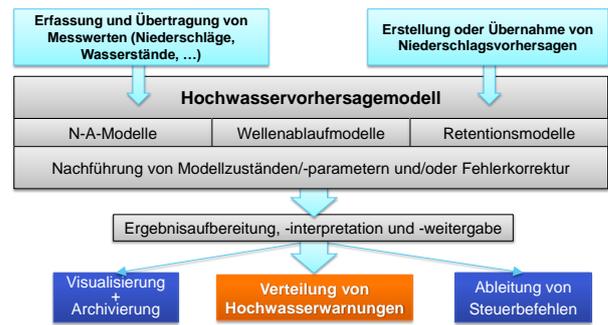


Abbildung 1.3.1: Die Rolle eines komponentenorientierten Hochwasservorhersagemodells bei der Ableitung von Hochwasserwarnungen.

kann eine meteorologische bzw. hydrologische Vorhersage zur Grundlage haben<sup>2</sup> (siehe Abb. 1.3.1). Konkret geht es dabei um die Prognose der weiteren, zu erwartenden Entwicklung der Hochwassergefährdung; entweder regional oder mit ganz konkretem Bezug zu einem Flusslauf, -abschnitt oder Querprofil. Dabei werden oft – so auch in Sachsen – komponentenorientierte Hochwasservorhersagemodelle eingesetzt, um die verschiedenen dominanten Prozesse adäquat simulieren und vorhersagen zu können. So kommen typischerweise zur Beschreibung von Abflussbildung und -konzentration klassische N-A-Modelle zum Einsatz, während der Wellenablauf oft mit hydraulischen/hydrodynamischen Ansätzen abgebildet wird. Weiterhin immanent wichtig ist die Berücksichtigung der Hochwasser dämpfenden Wirkung von Speichern; auch hierfür werden oftmals Modelle (Retentionsmodelle) eingesetzt. Details zum operationellen Einsatz hydrologischer Modelle zur Erstellung von Abflussvorhersagen finden sich im Abschnitt 2.3.

**Schlussfolgerung 4:** Eine Hochwasserwarnung muss nicht ausschließlich auf der Basis von Messwerten/Beobachtungen abgeleitet werden, sondern kann (und sollte) eine meteorologische bzw. hydrologische Vorhersage zur Grundlage haben. ❖

<sup>1</sup> Die Hochwassermeldeordnung (HWMO) spezifiziert als Verwaltungsvorschrift die Hochwassernachrichten- und Alarmdienstverordnung (HWNADO) näher.

<sup>2</sup> Hier soll auf die begriffliche Trennung zwischen „Warnung“ und „Frühwarnung“ verwiesen werden; eine Frühwarnung ist demnach eine Warnung auf Basis der *erwarteten* Entwicklung der Hochwassergefährdung und nicht auf Basis hydrologischer Beobachtungen (wie bei einer pegelbasierten Warnstrategie).

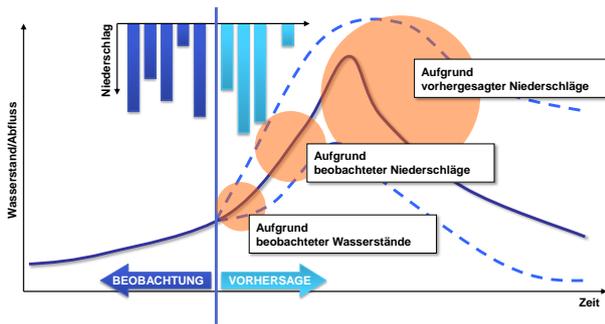


Abbildung 1.4.1: Das Vorhersageproblem; Datenanforderung in Abhängigkeit von der Vorhersageweite.

## 1.4 Abflussvorhersage für kleine Einzugsgebiete (als echtes hydro-meteorologisches Vorhersageproblem)

Wie bereits ausgeführt, sollte der Bewertung der Hochwassergefährdung (und damit einer eventuell darauf aufsetzenden Warnung) für kleine Einzugsgebiete eine hydrologische Vorhersage zugrunde liegen. Empirisch lässt sich sagen, dass mit zunehmender Vorhersageweite der Datenbedarf steigt und die Vorhersagegüte zurückgeht (siehe Abb. 1.4.1) bzw. die Unsicherheiten anwachsen. Die Gründe hierfür lassen sich leicht zeigen (siehe dazu auch Abb. 1.4.2):

Gegeben seien vier Einzugsgebiete: A, B, C und D, wobei die Einzugsgebietsgröße in dieser Reihenfolge abnehmen soll. Zusätzlich sei angenommen, die mittlere Konzentrationszeit in diesen Einzugsgebieten beträgt vom größten zum kleinsten 24, 12, 6 sowie 1 h. Weiterhin sollen die vier Einzugsgebiete bepegelt sein; es liegen also Abflussbeobachtungen  $Q_{A,B,C,D} = f(t)$  vor. Die Aufgabe sei die Erstellung einer Abflussvorhersage für einen Vorhersagezeitraum von 12 Stunden.

Für das größte Einzugsgebiet A ist die Konzentrationszeit mit 24 Stunden *größer* als der Vorhersagezeitraum von 12 Stunden; im Einzugsgebiet gefallener Niederschlag trägt also wesentlich erst nach 24 Stunden zum Abfluss am Pegel A bei. Da die Konzentrationszeit für das Gebiet B 12 Stunden beträgt, ist die durchschnittliche Laufzeit einer Hochwasserwelle von B nach A 12 Stunden (24 minus 12 Stunden). Daher ist der Abfluss am Gebietsauslass in den kommenden 12 Stunden ( $Q_{A, t=0...12h}$ ) maßgeblich durch den in den vergangenen 12 Stunden am Pegel B *beobach-*

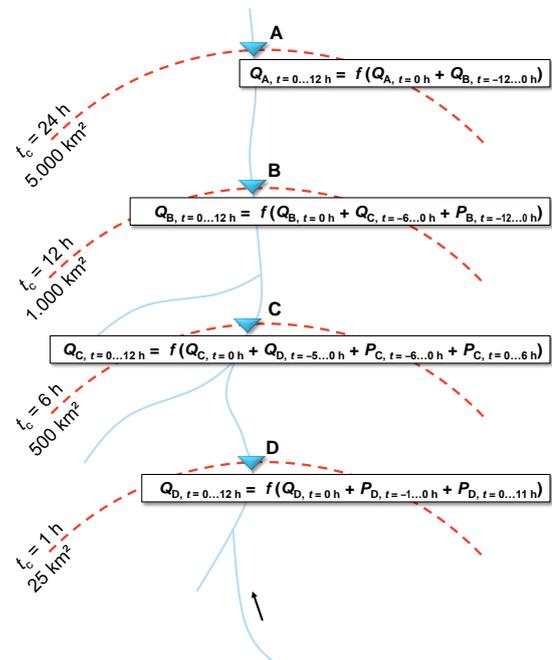


Abbildung 1.4.2: Das Vorhersageproblem; Datenanforderung in Abhängigkeit von der Einzugsgebietsgröße/Konzentrationszeit.

teten Abfluss ( $Q_{B, t=-12...0h}$ ) sowie den aktuellen Abfluss am Pegel A ( $Q_{B, t=0h}$ ) bestimmt. Der Einfluss des Zwischengebietes A–B soll zunächst vernachlässigt werden oder, mit anderen Worten, es wird davon ausgegangen, dass lediglich Gebiet B überregnet wird.

Betrachtet man Gebiet B, ist die Konzentrationszeit *gleich* der Länge des Vorhersagezeitraums; die Laufzeit zwischen den Pegeln C und B beträgt nun aber 6 Stunden, was wiederum heißt, dass lediglich die ersten 6 Stunden ( $Q_{B, t=0...6h}$ ) der Abflussvorhersage am Pegel B (neben dem aktuellen Abfluss am Pegel B;  $Q_{B, t=0h}$ ) durch die Abflussbeobachtung am Pegel C ( $Q_{C, t=-6...0h}$ ) mitbestimmt werden. Die Abflussvorhersage am Pegel B wird weiterhin durch die *beobachteten Niederschläge* für Gebiet B der vergangenen 12 Stunden ( $P_{B, t=-12...0h}$ ) bestimmt, welche spätestens nach 12 Stunden (Konzentrationszeit!) am Pegel B abflusswirksam werden.

Für Gebiet C sei die Konzentrationszeit 6 Stunden und damit *kürzer* als der Vorhersagezeitraum (12 Stunden). Die Wellenlaufzeit zwischen den Pegeln D und C beträgt also 5 Stunden. Damit sind die ersten 5 Stunden ( $Q_{C, t=0...5h}$ ) der Abflussvorhersage am Pegel C (neben dem aktuellen Abfluss am Pegel C –  $Q_{C, t=0h}$ ) unter anderem durch den Abflussverlauf am Pegel D ( $Q_{D, t=-5...0h}$ ) bestimmt. Bei angenommener flächenhafter Überregnung von Gebiet C

wird aber der abflusswirksame Beitrag aus Gebiet D (25 vs. 500 km<sup>2</sup>!) allerdings nur marginal sein. Der Gebietsniederschlag von Gebiet C wird am Pegel C spätestens nach 6 Stunden abflusswirksam. Damit ist lediglich das Vorhersageintervall  $Q_{C, t=0...6\text{ h}}$  durch den beobachteten Niederschlag ( $P_{C, t=-6...0\text{ h}}$ ) mitbestimmt. Zur Ermittlung des zweiten 6-Stunden-Intervalls des Abflusses am Pegel C ( $Q_{C, t=7...12\text{ h}}$ ) ist hingegen die Einbeziehung *vorhergesagter Niederschläge* ( $P_{C, t=0...6\text{ h}}$ ) notwendig; es wird nun also eine 6-Stunden-Niederschlagsvorhersage gebraucht!

Gebiet D ist ein kleines Kopfgebiet und soll eine Konzentrationszeit von 1 Stunde aufweisen. Analog zur Vorgehensweise für Einzugsgebiet C braucht es nun zur Ableitung einer 12-Stunden-Vorhersage neben dem aktuellen Abfluss am Pegel D ( $Q_{D, t=0\text{ h}}$ ) eine Niederschlagsbeobachtung mit einer Länge in der Größenordnung der Konzentrationszeit ( $P_{D, t=-1...0\text{ h}}$ ) wieder eine Niederschlagsvorhersage, diesmal allerdings für einen Vorhersagezeitraum von 9 Stunden ( $P_{C, t=0...11\text{ h}}$ ).

Es lässt sich also unter der Annahme verschiedener Restriktionen – vor allem aber mit Blick auf das Konzept der Konzentrationszeit (SHERMAN, 1932) – verallgemeinern, dass eine hydrologische Vorhersage dann eine Niederschlagsvorhersage mit einbeziehen muss, wenn die Konzentrationszeit maßgeblich kürzer als der gewünschte Vorhersagezeitraum ist, beziehungsweise, dass sich die notwendige Länge einer Niederschlagsvorhersage in erster Näherung aus der Differenz zwischen gewünschter Vorhersageweite der Abflussvorhersage und Konzentrationszeit ergibt. Für kleinere Einzugsgebiete mit Konzentrationszeiten von wenigen Stunden ist das hydrologische Vorhersageproblem streng genommen also ein echtes *hydro-meteorologisches Vorhersageproblem!*

Hier zeigt sich das Hauptproblem der hydrologischen Modellierung und Vorhersage für kleine Einzugsgebiete: sowohl die Erfassung/Messung von Niederschlag, als auch (und insbesondere) dessen Vorhersage sind bei abnehmender Gebietsgröße mit zunehmenden Unsicherheiten behaftet (Kapitel 7 widmet sich der Quantifizierung dieser Unsicherheiten). Weiterhin nimmt bei der Niederschlagsvorhersage naturgemäß die Güte mit zunehmender Vorhersageweite ab. Daraus ergibt sich ein zentrales und nicht vollständig aufzulösendes Dilemma; hydrologische Vorhersagen für kleine Einzugsgebiete benötigen (verglichen mit der Situation für größere Einzugsgebiete) tendenziell Niederschlagsvorhersagen (statt lediglich Niederschlagsbeobachtungen), welche allerdings aufgrund der Kleinskaligkeit

zwangsläufig ungenauer als für größere Einzugsgebiete sind (vergleiche dazu auch Abbildung 2.3.2). Es lässt sich also schlussfolgern, dass insbesondere für kleine Einzugsgebiete die Güte der hydrologischen Vorhersagen durch die Güte der Niederschlagsvorhersagen limitiert ist. COLLIER (2007) gelangt auf dieser Basis in seinem Überblicksartikel zu den Grenzen der hydro-meteorologischen Vorhersagbarkeit von Flash Floods zu der wenig optimistischen Einschätzung: „Nevertheless, it would be over optimistic to expect the reliable spatially accurate quantitative prediction of flash floods to extend beyond 1 or 2 hours ahead within the next 10 years.“<sup>1</sup>

**Schlussfolgerung 5:** *Insofern eine gewisse Vorwarnzeit beabsichtigt ist und/oder eine Warnung für kleine Einzugsgebiete erstellt werden soll, muss eine Vorhersage von Wasserstand und Abfluss verfügbar sein. Mit zunehmender Vorhersageweite sowie abnehmender Größe des betrachteten Gebietes steigt die Unsicherheit der Vorhersage und sinkt ihre Güte.* ❖

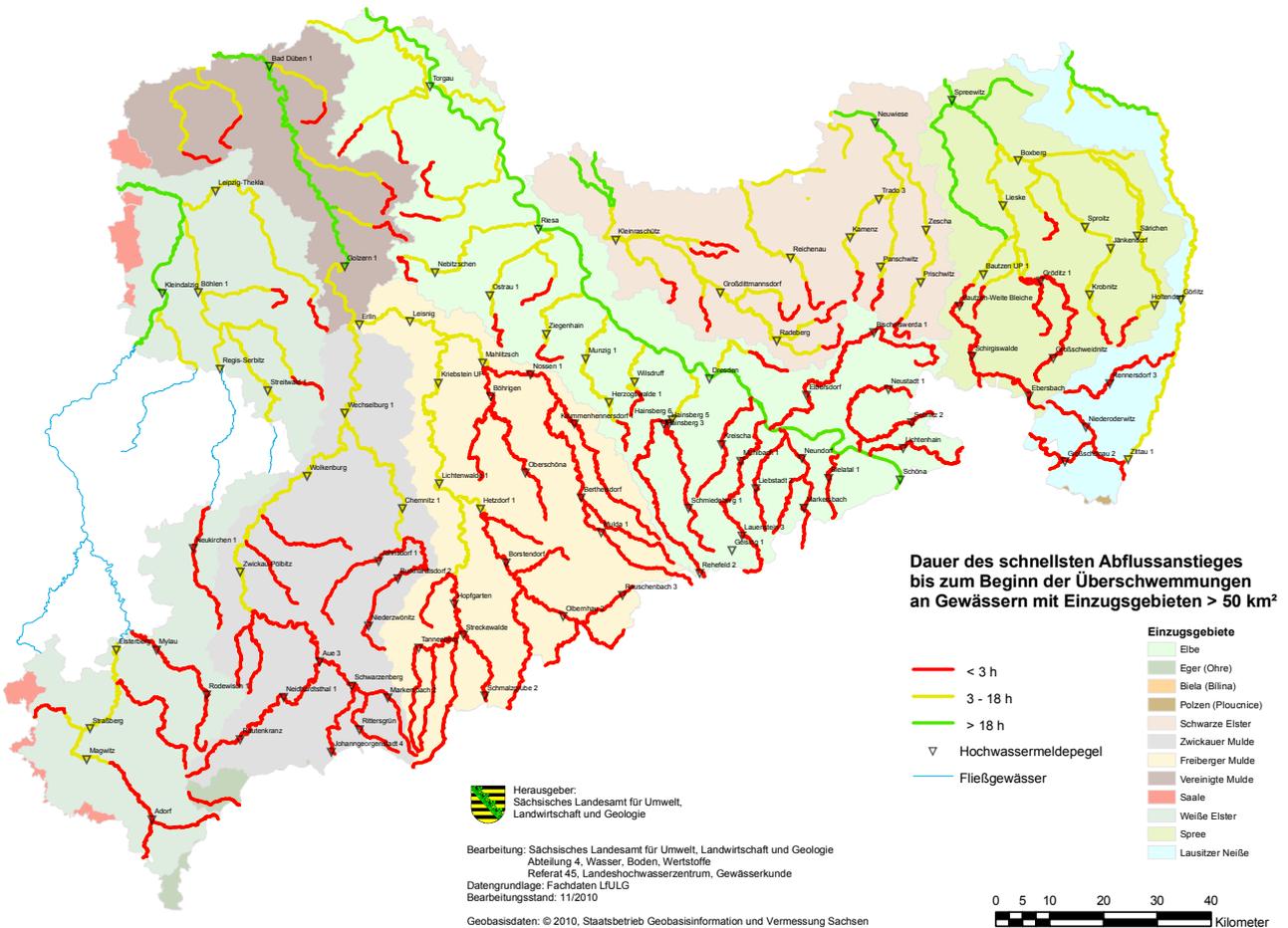
## 1.5 Kleine, schnell reagierende Einzugsgebiete und Hochwasserfrühwarnung

Wie bereits erwähnt, gibt es keine feste Definition eines „Hochwasserfrühwarnsystems“. UCAR (2010) gibt eine recht breite Definition; ein wirksames Frühwarnsystem für schnell reagierende Einzugsgebiete sollte folgendes leisten:

1. Warnungen auf Basis von Beobachtungen und/oder Vorhersagen erstellen,
2. Informationen über potentielle Risiken<sup>2</sup> in die Warnung integrieren,

<sup>1</sup>„Dennoch wäre es zu optimistisch zu erwarten, dass innerhalb der nächsten zehn Jahre eine verlässliche und räumlich exakte Vorhersage von Flash Floods mit einem Vorhersagezeitraum von mehr als ein oder zwei Stunden möglich sei.“

<sup>2</sup>Wird Risiko im allgemein anerkannten Sinne des Hochwasserrisiko-managements als Produkt von Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß aufgefasst (vergleiche auch Abschnitt 1.2), so handelt es sich dabei um eine sehr ambitionierte Forderung. Eher meint UCAR (2010) mit „Risiken“ potentielle Gefahren bei einem Sturzflutereignis, insbesondere für Leib und Leben (beispielsweise das Betreten oder Durchfahren von Unterführungen).



**Abbildung 1.5.1:** Dauer des schnellsten Abflussanstieges bis zum Beginn der Überschwemmungen an Gewässern mit Einzugsgebieten größer 50 km<sup>2</sup>. Dabei bedeuten die Farben rot: kleiner 3 Stunden; gelb: 3 bis 18 Stunden; grün: mehr als 18 Stunden.

3. eindeutige und zuverlässige Warnprodukte hinreichend früh für Entscheidungsträger und potentiell Betroffene bereitzustellen,
4. Notfallplanung, -vorsorge und -übung gewährleisten, um bei einer Warnung ein zielgerichtetes und effektives Handeln der Bewarten sicherzustellen.

MANI ET AL. (2012) führen an, dass ein Frühwarnsystem „Informationen für die Beurteilung der aktuellen Gefährdung ausgehend von Hochwasser“ liefern soll. Als zeitlichen Rahmen für den Vorhersagezeitraum einer ersten Frühwarnung nennen die Autoren dabei „einige Tage“. Weiterhin soll dann – eher kurzfristig – die Warnung konkretisiert und präzisiert werden. Diesen zweistufigen Ansatz schlägt auch KUNDZEWICZ (2013) vor, für den ein Hochwasserfrühwarnsystem generell ein „Hochwasserbereitschaftssystem auf kurzfristiger Ebene“ darstellt. Ein kontinuierlicher Betrieb wird als wichtiges Element erachtet, um überhaupt aus-

reichende Vorwarnzeiten gewährleisten zu können. Nach KUNDZEWICZ (2013) ist die notwendige Vorwarnzeit abhängig vom Verhältnis der Einzugsgebietsgröße zur Größe des potentiell gefährdeten Gebiets.

Wie für den Begriff „Hochwasserfrühwarnsystem“, so gibt es auch keine allgemein anerkannte Definition für „kleine Einzugsgebiete“. Üblicherweise spricht man dann von einem kleinen Einzugsgebiet, wenn bei intensiven Niederschlagsbeaufschlagungen aufgrund der naturräumlichen Gegebenheiten mit einer unverzüglichen Reaktion der Abflussgeschehens zu rechnen sein wird; innerhalb von Minuten oder Stunden nach Beginn eines Starkregenereignisse kann es zu Hochwasser in Folge von Überflutung und/oder Überschwemmung kommen. Das „Manual on Flood Forecasting and Warning“ der WMO (WMO, 2011) spricht dann von von Flash Floods, wenn Ereignisse kurzer Dauer mit einem vergleichsweise hohen Scheitelabfluss einhergehen.

Fasst man „kleine Einzugsgebiete“ als Gebiete der mittleren bis unteren Mesoskala auf („sub-mesoskalig“), so würde das eine Fläche bis zu 100 km<sup>2</sup> bedeuten (BECKER, 1992). HAPUARACHCHI ET AL. (2011) definieren Gebiete bis 300 km<sup>2</sup> und einer Scheitelanstiegszeit von bis zu sechs Stunden als kleine Einzugsgebiete. COLLIER (2007) nennt für die USA eine Gebietsgröße bis 400 km<sup>2</sup> und wiederum eine Scheitelanstiegszeit von sechs Stunden. Die für die Hochwasservorhersage zuständigen Behörden Baden-Württembergs und Hessens definieren Gebiete bis 200 km<sup>2</sup> als „klein“, in Rheinland-Pfalz setzt man die Grenze bei 500 km<sup>2</sup>. PHILIPP ET AL. (2015) definieren kleine Einzugsgebiete als „Gebiete, in denen die Prozesse der Abflussbildung und Abflusskonzentration dominieren“, wobei für den Festgesteinsbereich Sachsens eine Obergrenze von 200 km<sup>2</sup> festgelegt wird. Abbildung 1.5.1 zeigt die empirisch ermittelte Dauer des schnellsten Abflussanstieges bis zum Beginn der Überschwemmungen an den Gewässern Sachsens mit Einzugsgebieten größer 50 km<sup>2</sup>. Hieraus wird die Relevanz schnell reagierender Gebiete im Freistaat Sachsen stark deutlich.

Wie bereits erwähnt muss der Skalenbereich für Betrachtungen im Sinne einer Hochwasserfrühwarnung auch nach unten hin begrenzt werden, da bei sehr kleinräumiger Herangehensweise lediglich die Abflussbildung eine Rolle spielt. Bei hohen lokalen Niederschlagsintensitäten (in deren Folge potentiell Infiltrations- oder Sättigungsüberschuss eintritt) kommt es örtlich zu einem fast zeitgleichen Anstieg von Niederschlag und Abfluss. Der prädiktive Nutzen eines hydrologisch orientierten Frühwarnprodukts mit Blick auf den Mehrwert gegenüber einer „klassischen“ Wetterwarnung oder anderen auf Radardaten basierenden Produkten ist umso geringer, je lokaler die Betrachtungsweise ist. Die hierin vorgestellte Strategie zur Hochwasserfrühwarnung wird daher primär auf einen Skalenbereich zwischen 25 bis 200 km<sup>2</sup> fokussiert.

**Schlussfolgerung 6:** *Den Fest- und Lockergesteinsbereich Sachsens dominieren Gebiete, welche potentiell die Genese von Sturzfluten begünstigen. Das betrifft sowohl die meteorologischen Bedingungen (Begünstigung und Verstärkung von atmosphärischer Konvektion), als auch morphologisch-topologisch-hydrologische Aspekte, wie Hangneigung, Exposition, Gewässernetz sowie die Neigung zur Bildung schneller Abflusskomponenten.* ❖

## 1.6 Beispiele operationeller Hochwasserfrühwarnsysteme für kleine Einzugsgebiete

Die hier beschriebenen und diskutierten Systeme wurden anhand der im Abschnitt 1.1 gegebenen Definition eines Frühwarnsystems ausgewählt. Diese Auswahl stellt nur eine sehr kleine Teilmenge der weltweit vorhandenen operationellen Hochwasserfrühwarnsysteme dar und fokussiert auf Mitteleuropa und hat demnach nicht den Anspruch auf Vollständigkeit. Vielmehr soll so ein Schlaglicht auf typische Systeme geworfen werden. Auf eine systematische Beschreibung der Philosophie und fachlichen Methodik der jeweiligen Systeme wird verzichtet; hier wird auf Abschnitt 2.2 verwiesen.

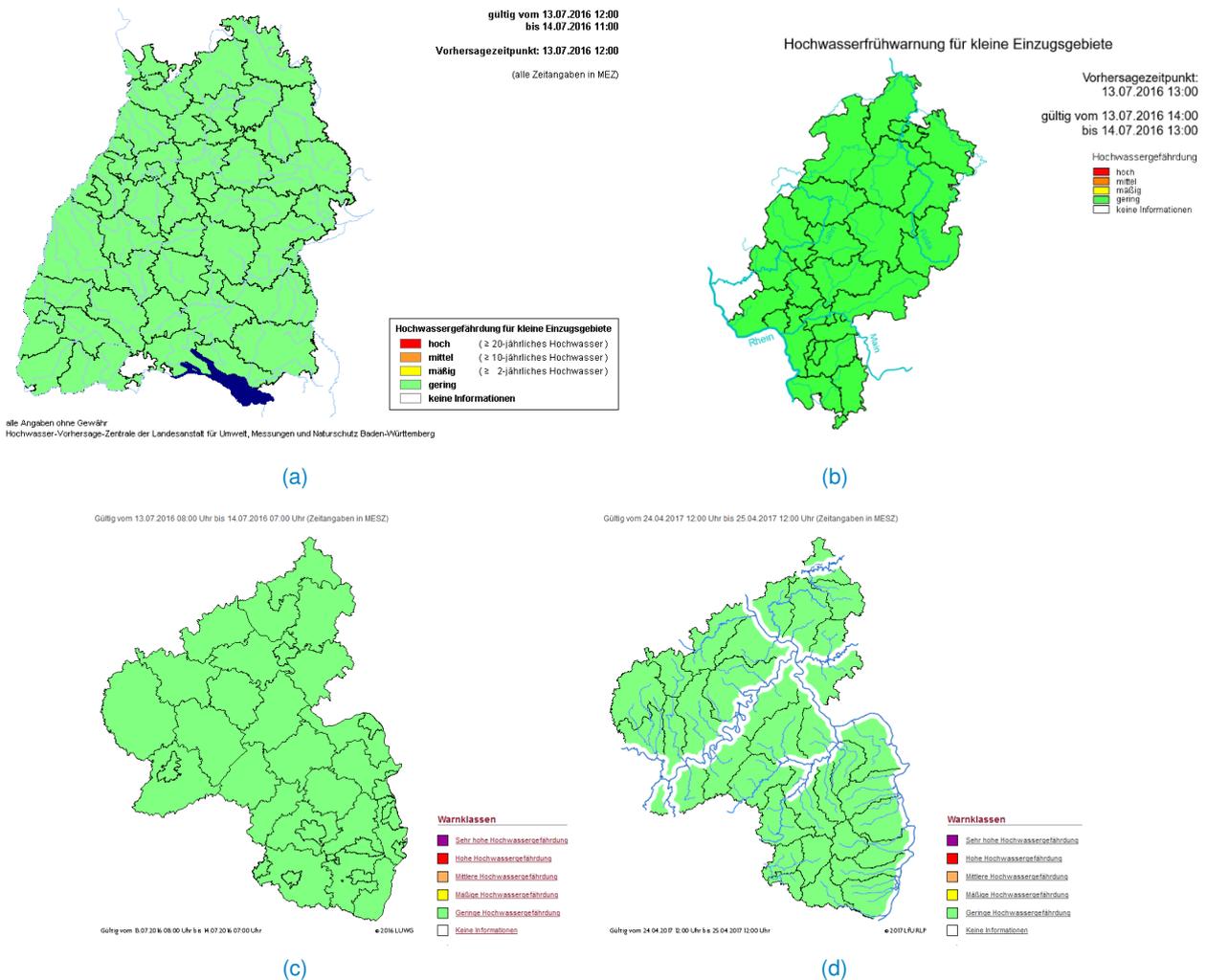
### 1.6.1 Hochwasserfrühwarnung für kleine Einzugsgebiete in Baden-Württemberg, Hessen und Rheinland-Pfalz

Die regionsbezogene Hochwasserfrühwarnung für kleine Einzugsgebiete in Baden-Württemberg wird von der Hochwasservorhersagezentrale der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz für Einzugsgebiete kleiner 200 km<sup>2</sup> bereitgestellt. Der Vorhersagezeitraum beträgt maximal 48 Stunden; für den Vorhersagezeitraum 24 bis 48 Stunden wird eine Art Abschätzung produziert. Die Frühwarnkarten (siehe Abb. 1.6.1) werden mittlerweile bis zu stündlich aktualisiert. Grundlage für die Ableitung von Warnungen ist eine flächendifferenzierte, operationelle hydrologische Modellierung<sup>1</sup>, welche das gesamte Landesterritorium erfasst. Die an den Modellknoten erzeugten Abflussvorhersagen werden dann mit regionalisierten Scheitelabflüssen/Scheitelabflussspenden abgeglichen.

Nach einem bestimmten Regelsystem werden Knoten innerhalb einer Warnregion (es werden die administrativen Grenzen der Landkreise verwendet), an welchen der prognostizierte Abfluss bestimmte Jährlichkeiten erreicht/überschreitet, gewichtet und eine flächige Warninformation abgeleitet. Es werden deterministische meteorologische Antriebe, konkret COSMO-DE sowie ICON-EU<sup>2</sup>,

<sup>1</sup> Konkret kommt hier dasselbe System wie für die operationelle Erstellung von pegelbezogenen Vorhersagen, nämlich LARSIM, zum Einsatz.

<sup>2</sup> Hat 2015 COSMO-EU abgelöst.



**Abbildung 1.6.1:** Hochwasserfrühwarnung für kleine Einzugsgebiete in Baden-Württemberg, Hessen und Rheinland-Pfalz:

(a) Regionsbezogene Hochwasserfrühwarnung für Einzugsgebiete kleiner 200 km<sup>2</sup> in Baden-Württemberg. Hydrologische Vorhersagen werden zu Warninformationen mit Flächenbezug aggregiert (Quelle: <http://www.hvz.baden-wuerttemberg.de>).

(b) Hochwasserfrühwarnung für Einzugsgebiete kleiner 200 km<sup>2</sup> in Hessen. Vorhersagesystem und Warnprodukt sind analog zu Baden-Württemberg (Quelle: <http://www.hochwasser-hessen.de>).

(c) Hochwasserfrühwarnung für Einzugsgebiete kleiner 500 km<sup>2</sup> in Rheinland-Pfalz. Vorhersagesystem sowie das generierte Produkt ähneln stark den jeweiligen Entsprechungen in Hessen bzw. Baden-Württemberg. Entgegen den Frühwarnprodukten Baden-Württembergs und Hessens werden vier statt drei Warnstufen sowie ein probabilistischer Antrieb verwendet (Quelle: <http://fruehwarnung.hochwasser-rlp.de>).

(d) Wie (c) nur aggregiert mit Bezug zu Flussgebieten bzw. Einzugsgebietseinheiten (Quelle: <http://fruehwarnung.hochwasser-rlp.de>).

verwendet. Zukünftig soll eine Zuordnung der Jährlichkeit zu örtlichen Hochwassergefährdungen in kleinen Einzugsgebieten via Hochwassergefahrenkarten möglich sein.

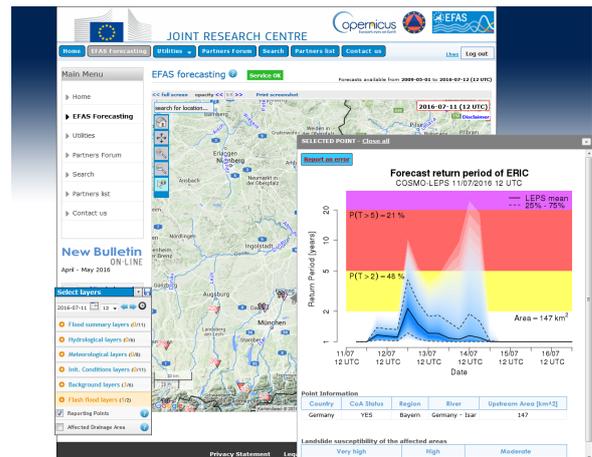
Das Hessische Landesamt für Natur, Umwelt und Geologie erstellt methodisch analog eine landkreisbezogene Frühwarnkarte (siehe Abb. 1.6.1) für einen Vorhersagezeitraum bis 24 Stunden. Es kommt ebenfalls das Wasserhaushaltsmodell LARSIM zum Einsatz. Die räumliche Obergrenze der Gültigkeit der Warninformation wird mit 200 km<sup>2</sup> angegeben. Das Warnprodukt wird derzeit noch lediglich einmal täglich aktualisiert; damit ist die Güte der hydrologischen Vorhersage sehr stark von der Qualität der verwendeten deterministischen quantitativen Niederschlagsvorhersage aus COSMO-DE/ICON-EU (siehe Abschnitt 2.1) abhängig.

Ein weiteres Warnprodukt wird erstellt und ausgegeben vom Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz, welches generell den Hochwassermeldedienst im Land koordiniert. Die Erstellung des Warnprodukts (siehe Abb. 1.6.1) ähnelt dem Verfahren in Hessen bzw. Baden-Württemberg; es kommt abermals LARSIM als hydrologisches Modell zum Einsatz. Der Vorhersagezeitraum beträgt 24 Stunden und die Aktualisierung erfolgt nach jeweils 12 Stunden (anlassbezogen in kürzeren Intervallen). Der wesentliche Unterschied zu den vorgenannten System ist die Verwendung probabilistischer Niederschlagsvorhersagen als Antrieb (COSMO-DE-EPS), was eine häufigkeitsbezogene Betrachtung bei der Ableitung von Warnprodukten erfordert (siehe Abschnitt 2.7).<sup>1</sup> Die Frühwarnung gilt für Einzugsgebiete kleiner 500 km<sup>2</sup>; seit 2017 wird sie nicht mehr für Landkreise, sondern einzugsgebietsbezogen ausgegeben (LFU, 2016).

### 1.6.2 Flash-Flood-Warnungen des European Flood Awareness Systems (EFAS-ERIC und ERICHA)

Das European Flood Awareness System EFAS nutzt flächendifferenzierte, flächendeckende hydrologische Modellierung (mittels des Modellsystems LISFLOOD) in erster Linie für pegelbezogenen Abflussvorhersagen für fast den gesamten Kontinent. Technisch betrieben wird EFAS durch das Europäische Zentrum für Mittelfristige Wettervorher-

<sup>1</sup> Streng genommen erfolgt hier keine „echte“ (konditionale) Unsicherheitsverarbeitung sondern lediglich eine häufigkeitsbasierte Auswertung auf Basis des unprozessierten („rohen“) Ergebnisensembles (siehe dazu auch Abschnitt 2.5).

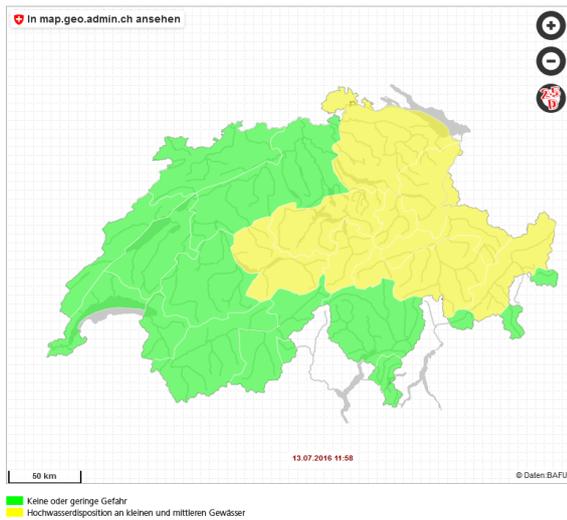


**Abbildung 1.6.2:** Ansicht des ERIC-Flash-Flood-Warnprodukts für ein 147-km<sup>2</sup>-Kopfgebiet der Isar. Das Vorhersagesystem verwendet das ECMWF-COSMO-LEPS-Ensemble als probabilistischen Antrieb (Quelle: <http://www.efas.eu>).

sage (ECMWF) in Reading, entwickelt wird es durch das EU Joint Research Centre (JRC) in Ispra. Durch den Antrieb mit meteorologischen Ensemblevorhersagen (konkret wird COSMO-LEPS-Output des ECMWF genutzt) können probabilistische Vorhersagen mit über 130 Mitgliedern produziert und zu spezifischen Warnprodukten aggregiert werden.

Mittels des gridbasierten hydrologischen Modells werden zusätzlich auf täglicher Basis für kleine Einzugsgebiete größer 25 km<sup>2</sup> für einen Vorhersagezeitraum von bis zu 72 Stunden regionale, räumlich aggregierte Abflussspenden bestimmt und diese (auf Basis von Jährlichkeiten) mit Schwellenwerten abgeglichen. Dabei kommt ein transienter Abflussbeiwert zum Einsatz, um unter anderem die Gebietsvorfeuchte zu berücksichtigen; die Methodik wird als European Runoff Index based on Climatology – ERIC bezeichnet (RAYNAUD ET AL., 2014). Durch den probabilistischen Antrieb kann eine probabilistische Frühwarnung erfolgen, welche wie in Abbildung 1.6.2 gezeigt aufbereitet wird. Dabei kommt ein statistisches Postprocessing zum Einsatz (siehe dazu Abschnitt 2.5). Bei EFAS handelt es sich um ein nur den nationalen und regionalen europäischen hydrologischen und meteorologischen Diensten zugängliches System.

Seit März 2017 ist in EFAS der Output des European Rainfall-Induced Hazard Assessment System (ERICHA) verfügbar. ERICHA basiert auf einer schwellenwertbezogenen Bewertung kritischer Niederschlagsmengen aus einem Radar-QPE sowie einem Radar-Nowcasting-Produkt



**Abbildung 1.6.3:** Hochwasserwarnkarte für kleine und mittlere Einzugsgebiete in der Schweiz (Quelle: <http://www.naturgefahren.ch>).

(Vorhersagezeitraum: 2 h). Hydrologische Aspekte wie Bodenfeuchte sowie die Abflusskonzentration werden berücksichtigt. Eine Bewertung oder gar Verifikation des ERICHA-Produkts kann zum Redaktionsschluss dieses Berichts nicht seriös vorgenommen werden. Allerdings ist hervorzuheben, dass das LHWZ als regionaler EFAS-Partner vollen Zugriff auf ERICHA hat.

### 1.6.3 Hochwasserwarnung für kleine und mittelgroße Fließgewässer in der Schweiz

In der Schweiz ist der hydrologische Dienst beim BAFU (Bundesamt für Umwelt) angesiedelt. Dort wird auf Basis flächendifferenzierter, probabilistisch angetriebener hydrologischer Modellierung unter anderem einmal täglich eine „Hochwasserwarnkarte für kleine und mittelgroße Fließgewässer“ erstellt (siehe Abb. 1.6.3). Die räumliche und zeitliche Gültigkeit der Warninformationen wird nicht weiter spezifiziert oder kommuniziert. Es gibt generell für kleine und mittelgroße Gewässer nur zwei Gefahren<sup>1</sup>: keine oder geringe Gefahr (grün) und „Hochwasserdisposition“ (ohne Angabe zum Schweregrad; gelb). Dabei erfolgt die Zuordnung zur Kategorie „Hochwasserdisposition“ (gelb) ab ca. HQ(2).

<sup>1</sup>Obleich auf dem Portal von „Gefahr“ gesprochen wird, müsste nach Definition in Abschnitt 1.2 hier eher von „Gefährdung“ die Rede sein.

Gefahrenstufe 2 (mässige Gefahr)	
<b>Auswirkungen</b>	Bei dieser Wasserführung sind lokale Ausuferungen (das Wasser verlässt das Bachbett) und Überflutungen unwahrscheinlich, aber nicht auszuschliessen. In Ausnahmefällen sind lokal Überflutungen von Strassenunterführungen, Tiefgaragen und Kellerräumen möglich. Lokale Behinderungen an exponierten Verkehrswegen sowie lokale Schäden in kleinerem Umfang sind unwahrscheinlich aber nicht auszuschliessen.
<b>Verhalten</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Der Aufenthalt im Bereich von Fließgewässern kann gefährlich sein. Halten Sie vorsichtshalber genügend Abstand.</li> <li>• Verfolgen Sie die Situation und treffen Sie erste Schutzmassnahmen.</li> <li>• Weitere Informationen finden Sie unter <a href="#">»Verhalten während eines Hochwassers«</a>.</li> </ul>
<b>Beschreibung Mess- und Prognosewerte</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Fließgewässer:</b> Der Abfluss im Fließgewässer liegt im Bereich eines Ereignisses, das im Schnitt alle 2 bis 10 Jahre (HQ2 - HQ10) einmal auftritt. Diese Grenzwerte beruhen nicht nur auf statistischen Daten allein, sondern auch auf Erfahrungswerten über das Verhalten der Gewässer.</li> <li>• <b>Seem:</b> Der Seespiegel liegt über der Quote um 1/3 der Bereich zwischen dem maximalen Jahreszeitmittel und der Hochwassergrenze aber unter der Gefahrenschwelle 2.</li> </ul>

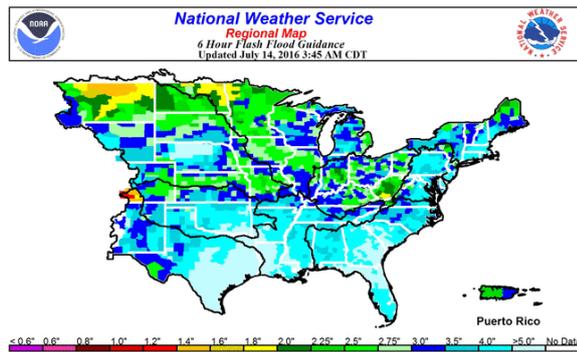
**Abbildung 1.6.4:** Die Warnprodukte des BAFU begleiten die Beschreibung von Gefahrenstufe mit Verhaltensempfehlungen, beispielhaft für die Gefahrenstufe 2 (Quelle: <http://www.naturgefahren.ch>).

Besonders hervorzuheben sind die neben den Warnkarten und Erläuterungen der sog. Gefahrenstufen bereitgestellten Verhaltensempfehlungen (siehe Abb. 1.6.4; beispielhaft für die Gefahrenstufe 2). Weiterhin interessant ist die Bereitstellung eines Rückmeldeformulars für den Nutzer, um zum einen Feedback zur Nutzbarkeit der Warnprodukte zu ermöglichen und zum anderen im Nachgang nutzerseitige Informationen über kleinräumige Ereignisse zu sammeln.

### 1.6.4 Flash Flood Guidance

Flash Flood Guidance (FFG) ist ein wichtiges und das weltweit am häufigsten verwendete Konzept bei der Ableitung von Hochwasserfrühwarnungen für kleine, schnell reagierende Einzugsgebiete (siehe auch Abschnitt 2.2). Der generelle Ansatz dabei ist, eine kritische Regenmenge zu ermitteln, welche in einer gewissen Zeit in der Zukunft<sup>2</sup> zu beginnender Ausuferung kleiner Gewässer führt. Diese kritische Regenmenge wird abhängig von Bodenfeuchte und Schneerücklage mittels deterministischer hydrologischer

<sup>2</sup>Zumindest in den USA wird für den Fall, dass beim Abgleich mit Niederschlagsvorhersagen FFG-Werte erreicht werden, eine sogenannte „Flash Flood Watch“ herausgegeben, welche zwar einen gewissen Vorhersagezeitraum abdeckt, aber zwangsläufig mit Unsicherheiten behaftet ist (aufgrund der Unsicherheiten bei der quantitativen Niederschlagsvorhersage; siehe auch Abschnitt 2.1). Die eigentliche Warnung („Flash Flood Guidance“) erfolgt dann erst bei Vorliegen von entsprechend kritischen beobachteten Niederschlagsmengen (vorzugsweise aus Radar abgeleitet); die Vorhersageweite des Produkts ist damit auf die Reaktionszeit des jeweiligen betrachteten Gebietes limitiert (weniger als eine Stunde für kleine Einzugsgebiete).



**Abbildung 1.6.5:** Flash Flood Guidance für die USA für eine Andauer von sechs Stunden; Niederschlagshöhen sind in Zoll angegeben (Quelle: <http://www.srh.noaa.gov/rfcshare/ffg.php>).

Modellierung<sup>1</sup> gewissermaßen vorberechnet und im operationellen Betrieb räumlich differenziert zu Warnprodukten, spezifisch für bestimmte Andauern, verarbeitet. Abbildung 1.6.5 zeigt beispielhaft das US-FFG-Produkt (erstellt und herausgegeben vom National Weather Service) für eine Andauer von sechs Stunden.

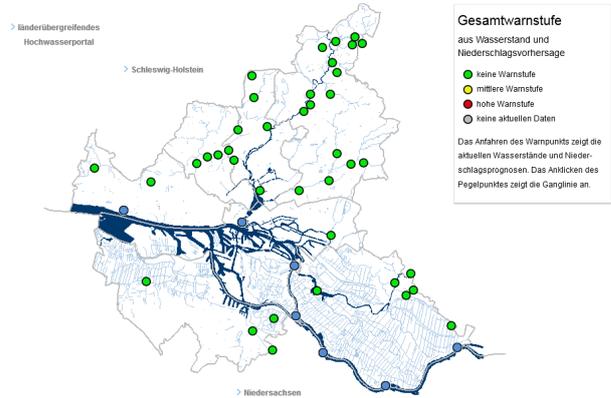
Basierend auf einer Absichtserklärung zwischen der WMO und verschiedenen US-Behörden wurde das FFG-Konzept mittlerweile für eine Reihe von Ländern weltweit implementiert, darunter sieben Länder in Zentralamerika, vier im Mekong-Einzugsgebiet, Haiti und Dominikanische Republik, Pakistan, acht Länder in der Region Schwarzes Meer/Mittlerer Osten, sieben in Südafrika sowie Mexiko.

### 1.6.5 Warndienst Binnenhochwasser Hamburg

Der Warndienst Binnenhochwasser Hamburg wird vom Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer betrieben. Methodisch handelt es sich um ein klassifizierendes, niederschlagsvorhersagegetriebenes sowie pegelbezogenes Hochwasserfrühwarnsystem. Lediglich die zum Vorhersagezeitpunkt aktuelle Wasserführung an den Vorhersagepegeln sowie die quantitative Niederschlagsvorhersage aus COSMO-DE werden klassifiziert einbezogen und daraus drei Warnstufen („keine, mittlere, hohe Warnstufe“) abgeleitet und auf einer Karte dargestellt (siehe Abbildung 1.6.6). Die dafür angesetzten Klassengrenzen basieren auf den Kriterien von Wetter- und Unwetterwarnungen des Deut-

<sup>1</sup>Der verwendeten Modelle/Ansätze sind – auch innerhalb der USA – nicht homogen. Das betrifft Methodik, verwendete Antriebsdaten, aber auch das Aktualisierungsintervall. Details zu regionsspezifischen FFG-Setups geben beispielsweise CLARK ET AL. (2014).

Pegel- und Warnstufen-Karte



**Abbildung 1.6.6:** Klassifikationsbasierte Warnkarte des Warndienstes Binnenhochwasser Hamburg. Aktuelle Pegelstände und Niederschlagsvorhersagen werden klassifiziert und zu einer Warnung verarbeitet (Quelle: <https://www.wabiha.de>).

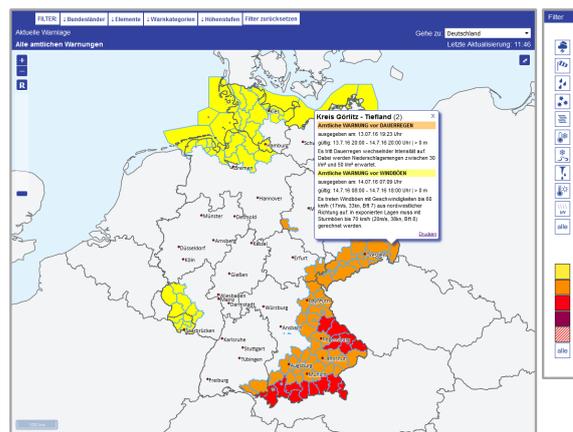
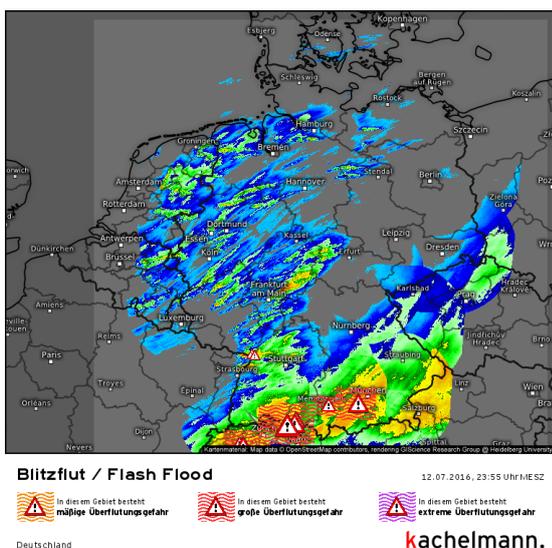
schen Wetterdienstes; im Falle einer Warnung vor extremen Unwetter ist allein diese die Grundlage für die Gesamtwarnstufe. Der Vorhersagezeitraum beträgt 24 Stunden, das Aktualisierungsintervall drei Stunden. Generell gilt die Warnung für den gesamten Vorhersagezeitraum, allerdings wird der Zeitpunkt/Intervall der größten Stundensumme in der Niederschlagsvorhersage mit angegeben.

### 1.6.6 Hochwasserfrühwarnung der Kachelmann GmbH

Der private Wetterdienst Kachelmann GmbH bietet seit Juli 2016 ein frei via Internet verfügbares Produkt<sup>2</sup> zur Abschätzung der regionalen Überflutungsgefährdung an (siehe Abb. 1.6.7). Basierend auf Radardaten<sup>3</sup> wird – mittels undokumentierter Methodik – die Überflutungsgefährdung mit ihrer räumlichen Ausdehnung und in drei Stufen („mäßig, groß, extrem“) angegeben. Wie bereits in Abschnitt 1.4 ausgeführt, kann mit dieser Philosophie bestenfalls eine Vorhersageweite in der Größenordnung der Reaktionszeit

<sup>2</sup>Wortmeldungen der Kachelmann GmbH auf Twitter zufolge ist ein App-basierter Push-Nachrichtendienst geplant. Seit August 2016 ist das Frühwarnprodukt zunächst über das Portal [www.meteosafe.com](http://www.meteosafe.com) kostenfrei per Email abonnierbar, danach soll es laut Angaben auf dem Portal die Möglichkeit geben, Textnachrichten zugestellt zu bekommen.

<sup>3</sup>Fortlaufende Beobachtung des Produkts lassen vermuten, dass die 24-, 6- und 1-stündigen Regensummen für die Erstellung gewichtet bewertet werden. Das Produkt wird 5-minütig aktualisiert; mutmaßlich kommt das vom DWD bezogene RX-Produkt zum Einsatz, welches mit einer nicht dokumentierten Methodik quantifiziert wird. Solch eine erste Quantifizierung überschätzt häufig die Niederschlagsintensitäten (siehe Abschnitt 2.1).



**Abbildung 1.6.8:** OpenLayers-basierte Ansicht von DWD-Warnungen (mit freundlicher Genehmigung von Manuel Voigt, DWD-RWB Leipzig). Im Juli 2016 stellte der DWD sein System von landkreis- (ca. 400 in Deutschland) auf gemeindebezogene (ca. 10.000 Teilflächen) Warnungen um. OpenLayers ist eine JavaScript-Bibliothek zur Anzeige von Geodaten in einem Webbrowser.

**Abbildung 1.6.7:** Hochwasserfrühwarnkarte des privaten Wetterdienstes Kachelmann GmbH. Das Produkt basiert mutmaßlich ausschließlich auf der Bewertung bereits gefallener Niederschläge (sichtbar im Hintergrundfeld; Quelle: <http://www.kachelmannwetter.com>).

des vom Niederschlag betroffenen Gebiets erreicht werden. Besonders bei lokalen Extremereignissen liegt die Reaktionszeit im Bereich von weniger als einer Stunde; bei massiven Niederschlagsintensitäten kann es durchaus zu einem fast zeitgleichen Anstieg von Niederschlag und Abfluss kommen. Hydrologische Aspekte wie Vorfeuchte, Gebiets-eigenschaften etc. gehen offenbar bei der Erstellung des Warnprodukts nicht ein (im Gegensatz beispielsweise zu ERICHA, vergleiche Abschnitt 1.6.2). Der prädiktive Nutzen des Produkts mit Blick auf den Mehrwert gegenüber einer „klassischen“ Wetterwarnung oder anderen, hochfrequent verfügbaren quantitativen Radarprodukten ist daher eher als gering einzuschätzen; es liegen zum Produkt weiterhin keinerlei Verifikationsuntersuchungen vor. Nach der hierin gewählten Definition (siehe Abschnitt 1.1) handelt es sich bei dem Produkt aber um eine Hochwasserfrühwarnung.

### 1.6.7 Amtliche Wetterwarnungen des Deutschen Wetterdienstes

Da kleinräumige Hochpassereignisse zuvorderst niederschlagsgetrieben sind, sollen an dieser Stelle auch die amtlichen Wetter- und Unwetterwarnungen<sup>1</sup> des Deutschen Wetterdienstes erwähnt werden (siehe Abb. 1.6.8), obgleich

es sich dabei nicht um eine Hochwasserfrühwarnung im engeren Sinne handelt. Dennoch erlauben die abgestuften Warnungen, besonders bezüglich des Kriteriums „Starkregen“, eine gute Abschätzung der Hochwasserneigung, jedoch ohne beispielsweise die hydrologischen Vorbedingungen mit einzubeziehen. Ein großer Vorteil der DWD-Warnungen ist, dass diese bereits vor dem Auftreten relevanter Niederschlagsmengen ausgegeben werden und stets eine Experteneinschätzung beinhalten. Nicht unerwähnt soll auch bleiben, dass seit geraumer Zeit mit der amtlichen App „WarnWetter“ ein Tool existiert, mit dem sich jeder potentiell Betroffene zielgenau und gewissermaßen maßgeschneidert vor Wettergefahren warnen lassen kann.

### 1.6.8 Kurze Gegenüberstellung und Diskussion der vorgestellten operationellen Systeme

Tabelle 1.6.1 stellt die vorgestellten Frühwarnsysteme hinsichtlich einiger wichtiger Kriterien gegenüber. Legt man diese – natürlich sehr begrenzte – Auswahl zugrunde, lassen sich einige Kernaussagen herausstellen und zusammenfassen:

- Es gibt entweder auf operationeller hydrologischer Modellierung basierende Systeme (Antrieb mit meteorologischen Beobachtungen und Vorhersagen) oder

<sup>1</sup>Zusätzlich gibt es noch die sogenannte „Vorabinformation Unwetter“.

**Tabelle 1.6.1:** Gegenüberstellung der vorgestellten Hochwasserfrühwarnsysteme.

System/Produkt	Hydrologischer Bezug	Räumlicher Bezug	Vorhersagezeitraum (h)	Aktualisierungsintervall (h)	Grundlage	QPF-Antrieb
Hochwasserfrühwarnung Baden-Württemberg	Einzugsgebiete kleiner 200 km <sup>2</sup>	Landkreise	24 (48)	1 <sup>#</sup>	hM	d
Hochwasserfrühwarnung Hessen	Einzugsgebiete kleiner 200 km <sup>2</sup>	Landkreise	24	24 <sup>~</sup>	hM	d
Hochwasserfrühwarnung Rheinland-Pfalz	Einzugsgebiete kleiner 500 km <sup>2</sup>	Einzugsgebiete <sup>§</sup>	24	12 <sup>~</sup>	hM	p
EFAS-ERIC/ERICHA (EU JRC Ispra)	Einzugsgebiete größer 25 km <sup>2</sup>	Gerastert	72	24	hM	p
Warnung für kleine Gewässer Schweiz	Kleine und mittlere Gewässer	Einzugsgebiete	24	24	hM	p
Flash Flood Guidance	Einzugsgebiete	Gerastert	Variabel	Meist 24	hM <sup>+</sup>	d
Warndienst Binnenhochwasser Hamburg	Einzugsgebiete	Einzugsgebiete	24	3	K	d
HW-Frühwarnung Kachelmann GmbH	–	Gerastert	Reaktionszeit	5-minütig	N	–
DWD-Warnungen	–	Landkreise*	Variabel	Laufend	E	d, p

§Bis 2016: Landkreise (LFU, 2016); \*seit Juli 2016 auch Gemeinden; #Differenz Bereitstellungszeit zu Vorhersagezeitpunkt ein bis zwei Stunden; ~anlassbezogen kürzeres Aktualisierungsintervall; +hier wird die hydrologische Modellierung „vorab“, also nicht operationell durchgeführt; eigentlicher Modellinput im operationellen Betrieb: beobachtete/vorhergesagte Niederschläge; hM: deterministische hydrologische Modellierung; K: Klassifikationsansatz; N: lediglich Niederschlag wird verwendet; E: Experteneinschätzung auf Basis weitgehend automatisierter Guidance; d: deterministischer QPF-Antrieb (QPF: Quantitative Precipitation Forecast – siehe Abschnitt 2.1); p: probabilistischer QPF-Antrieb.

Systeme, welche ohne aufwändige operationelle hydrologische Modellierung auskommen.

sche Bedeutung von Fall zu Fall unterschiedlich sein kann.

- Der typische Vorhersagezeitraum ist 24 Stunden; typisch ist weiterhin die mindestens tägliche Aktualisierung der generierten Warnprodukte.
- Probabilistische Antriebe bzw. probabilistische Methoden sind durchaus verbreitet.<sup>1</sup>
- Kategorisierte „Ampelkarten“ scheinen ein beliebtes Warnprodukt zu sein.
- Meist werden zwei bis fünf „Gefahren-“, „Gefährdungs-“ oder „Warnstufen“ verwendet, wobei deren spezifi-

- Warninformationen werden meist räumlich aggregiert (z. B. auf Landkreisebene) oder ein gerastertes Produkt abgeleitet.

Bemerkenswert ist, wenn man den aufgeführten Systemen pauschal denselben Zweck (Hochwasserfrühwarnung) zuerkennt, der krasse Unterschied bezüglich des jeweils zu treibenden methodischen und operationellen Aufwandes, vergleicht man beispielsweise das Kachelmann-System (lediglich Bewertung von Regensummen) mit EFAS-ERIC (flächendifferenzierte, deterministische hydrologische Modellierung mit Antrieb durch probabilistische meteorologische Vorhersagen).<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Thomas Adams, Herausgeber von ADAMS & PAGANO (2016) bemerkt dazu in einem Interview (<http://hepex.irstea.fr/flood-forecasting-systems-around-the-world-interview-with-thomas-adams-and-tom-pagano/>): „A few countries have ensemble products, including public products, but generally it has been an uneasy transition from deterministic to probabilistic products. I would liken it to the transition from point-based to graphical products in weather forecasting; initially there were difficulties and frustrations and questions about if this is what the user wanted and how we can keep experts in the loop... But now it is almost taken as given. There still is a major challenge with end-users accepting and understanding probabilistic forecasts — much needs to be done on this front.“

<sup>2</sup>Der methodische und operationelle Aufwand ergibt sich hier aus vielen Belangen, wie Handling der Inputdaten, Datenassimilation, Verarbeitung und Propagierung der Inputparameterunsicherheit („Datenunsicherheit“), Berücksichtigung weiterer Unsicherheitsquellen (Modell- und Prozessparameterunsicherheit), probabilistische Bewertung der Modellergebnisse, rechentechnischer Aufwand beim Betrieb, Aufwand bei Nachführung (siehe Abschnitt 2.3), Fehlerkorrektur sowie Prozessparameterbestimmung (Kalibrierung), um nur die wichtigsten zu nennen.

Hier wird erneut die ganz zentrale Frage bei der Hochwasserfrühwarnung für kleine, schnell reagierende Einzugsgebiete aufgeworfen: Welchen Mehrwert (i. S. des prädiktiven Nutzens) haben bestimmte, eher hydrologisch orientierte Ansätze, gegenüber einer Warnung, welche lediglich auf der Bewertung von gefallenem bzw. vorhergesagtem Niederschlag beruht? Oder – aus einem etwas anderen Blickwinkel – rechtfertigt die erwartungsgemäß große Unsicherheit in den Input- bzw. Vorhersagedaten (v. a. bei sommerlichen, konvektiv geprägten Starkregen) die Verwendung des einen oder des anderen Ansatzes? Diese und verwandte Fragen sollen im vorliegenden Bericht – zumindest für Sachsen – geklärt werden (siehe Teil II).

**Schlussfolgerung 7:** *Es gibt kein standardisiertes Hochwasserfrühwarnsystem; jedes Frühwarnsystem sollte einen starken regionalen Bezug bei Konzeption und Betrieb haben. Bemerkenswert ist die zunehmende Verarbeitung probabilistischer Antriebe, insbesondere bei der Ganglinienvorhersage. Probabilistische Vorhersageprodukte hingegen werden derzeit noch eher Fachnutzern vorbehalten.* ❖

## 2 Stand der Technik, Methoden, Werkzeuge zur Hochwasserfrühwarnung für kleine Einzugsgebiete

Für die kontinuierliche Bereitstellung von Produkten zur Hochwasserfrühwarnung ist die operationelle Erhebung, Analyse und Verarbeitung von (insbesondere meteorologischen) Antriebsdaten, der operationelle Betrieb hydrologischer Modelle sowie die Erzeugung von geeigneten Warnprodukten und deren Kommunikation notwendig. Kurzum, es ist eine ganzheitliche Betrachtung erforderlich, wenn es darum geht, ein operationelles Hochwasserfrühwarnsystem zu konzipieren und zu betreiben (siehe Abbildung 2.0.1). Dieses Kapitel soll dafür in der gebotenen Breite und in hinreichender Tiefe die methodischen Grundlagen liefern, welche im Rahmen einer *effektiven*, *verlässlichen* und *adressatengerechten* Hochwasserfrühwarnstrategie antizipiert werden müssen.

Effektiv meint, dass die Frühwarnung so beschaffen ist, dass sie überhaupt beim Nutzer einen potentiellen Nutzen entfalten kann; niemandem nützt beispielsweise eine Warnung, ohne dass mindestens ein für den Nutzer spezifisch notwendiger Vorhersagezeitraum abgedeckt wird.

Verlässlich bedeutet, dass es ein ausgewogenes, durch den Nutzer verstandenes und akzeptiertes Verhältnis zwischen richtig/falsch positiven/negativen Vorhersagen bzw. Warnungen gibt (siehe dazu auch Tabelle 2.0.1). Letztendlich sind nämlich für den Empfänger nur die im Sinne von Tabelle 2.0.1 „richtigen“ Vorhersagen auch wirklich richtig (grün hinterlegt). Falsch positive Vorhersagen (wird gemeinhin aus „Fehlalarm“ bezeichnet; gelb hinterlegt) bedeuten zwar, dass tatsächlich kein Ereignis aufgetreten ist, sie schmälern aber u. a. die Glaubwürdigkeit der Warnung. Der ungünstigste Fall ist sicherlich der einer falsch negativen Vorhersage (kein Ereignis vorhergesagt, aber Ereignis eingetreten – rot hinterlegt).

Schließlich muss eine Warnung adressatengerecht sein. Der Empfänger muss in die Lage versetzt werden, die in der Warnung enthaltenen Informationen in konkrete Entscheidungen einfließen zu lassen; die Warnung soll-

**Tabelle 2.0.1:** Standard-Kontingenztafel zur Illustration der verschiedenen Ausgänge einer binären (ja/nein) Vorhersage.

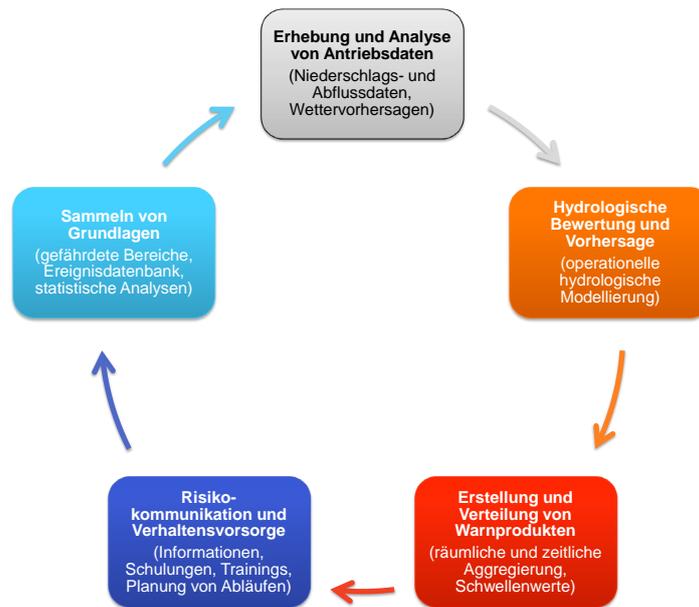
	Ereignis eingetreten	Ereignis nicht eingetreten
Ereignis vorhergesagt	Richtig positiv	Falsch positiv
Kein Ereignis vorhergesagt	Falsch negativ	Richtig negativ

te die Qualität der daraufhin erfolgenden Handlungen so beeinflussen, dass für den Empfänger ein Nutzen entsteht.

**Schlussfolgerung 8:** Ein Frühwarnsystem muss effektiv, verlässlich und adressatengerecht sein. Ein umfassendes Frühwarnsystem kann nicht nur Module zur Erstellung der eigentlichen Warnprodukte enthalten; vielmehr sollten Aspekte wie Verteilung von Warnungen, Risikokommunikation, Informations- und Verhaltensvorsorge sowie Grundlagenerhebungen (z. B. Ereignisanalysen) in einem ganzheitlichen Frühwarnkonzept Niederschlag finden. ❖

### 2.1 Meteorologische Grundlagen und Produkte (QPEs, QPFs)

Die hierin im Fokus stehenden Ereignisse sind in der Mehrzahl direkt niederschlagsgetrieben (siehe Abschnitt 1.1). Daher ist die raum-zeitlich hoch aufgelöste Erfassung des Niederschlags für die Bewertung der aktuellen und weiteren Gefährdungssituation durch kleinräumige Überschwemmungen bzw. Überflutungen unabdingbar. Zur Erweiterung des Vorhersagezeitraums sind weiterhin Vorhersagen des Niederschlagsverlaufs in Raum und Zeit unumgänglich (siehe Abschnitt 1.4).



**Abbildung 2.0.1:** Aspekte bei der operationellen Erstellung und Verteilung von Warnungen im Sinne eines ganzheitlichen Hochwasserfrühwarnsystems (in Anlehnung an UCAR, 2010).

### 2.1.1 Verfahren der Niederschlagsschätzung (QPE)

Die raum-zeitliche Erfassung des Niederschlagsverlaufs zur Ableitung eines sogenannten QPE (Quantitative Precipitation Estimate) kann im Wesentlichen auf den folgenden drei Prinzipien basieren, wobei für die operationelle Hochwasservorhersage vor allem die ersten beiden Verwendung finden:

1. Bodenmessung am Punkt (direkte Erfassung),
2. bodengestützte Fernerkundung sowie
3. luft- oder raumgestützte Fernerkundung.

Bodenmessungen am Punkt werden mit sogenannten Ombrometern (Regenschreiber) durchgeführt. Es kommen in der Regel wägebasierte Systeme<sup>1</sup> oder Kippwaagen<sup>2</sup> zum

<sup>1</sup>Das Prinzip ist hier die durch den Niederschlag verursachte Änderung des Gewichts eines Sammelbehälters zu erfassen und daraus auf die auf eine Auffangfläche definierter Größe aufgetroffene Niederschlagsmenge zu schließen.

<sup>2</sup>Hier wird der aufgefangene Niederschlag auf ein kippend gelagertes System geführt, wo wechselseitig in einem kleinen Auffanggefäß eine bestimmte Regenmenge gesammelt werden kann. Ist ein Gefäß voll, kippt es nach unten und damit das zweite Gefäß nach oben, welches nun befüllbar ist. Beim Kippen wird ein Kontakt geschlossen. Zwischen der Kippfrequenz und dem zeitlichen Intensitätsverlauf des Niederschlags wird im Labor durch Auswertung von Berechnungsversuchen ein funktionaler Zusammenhang (i. S. einer Eichbeziehung) hergestellt.

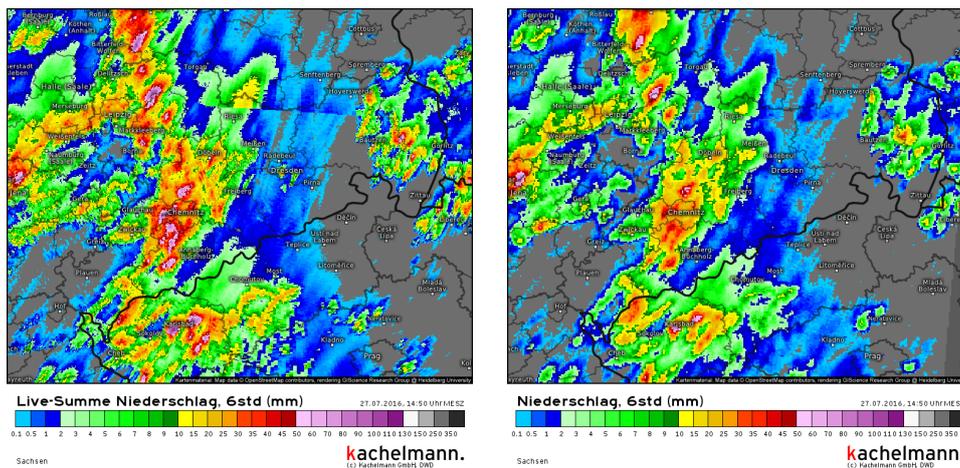
Einsatz. Regensammler (z. B. wie der allseits bekannte „Hellmann“) kommen mit Blick auf die Anforderungen der hydrologischen Vorhersage in kleinen, schnell reagierenden Einzugsgebieten nicht in Frage, da mit ihnen nur totalisierende Messungen möglich sind und die Niederschlagshöhe meist nur täglich (oder seltener) bestimmt wird.

In den letzten Jahrzehnten unverzichtbar geworden für die operationelle Hydrologie sind Verfahren der bodengestützte Fernerkundung, zuvorderst die radarbasierte Niederschlagserfassung. Der Vorteil dabei ist, dass quasi in Echtzeit die Niederschlagsverteilung über einem großen Gebiet zumindest qualitativ erfasst werden kann. Radarverfahren beruhen dabei auf Emission von Mikrowellen (meist im Gigahertzbereich) und der Messung reflektierter Signalanteile. Befindet sich Wasser in Form von Hydrometeoren im Signalweg, so wird aufgrund der Dipoleigenschaften des Wassermoleküls das Signal stärker reflektiert. Die funktionale Beziehung zwischen Reflektivität und Regenrate ( $Z$ - $R$ -Beziehung) ist dabei eine nichtlineare Beziehung in der Form:<sup>3</sup>

$$Z = aR^b \quad (2.1.1)$$

mit der Reflektivität (oder Reflektivitätsfaktor)  $Z$  (in der Einheit  $\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}$ ), der Niederschlagsrate  $R$  (in  $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )

<sup>3</sup>Es existiert heutzutage ein ganzer Zoo an  $Z$ - $R$ -Beziehungen, mit teilweise wesentlich komplexerer mathematischer Form.



**Abbildung 2.1.1:** Sechsstündige Radar-QPEs für Sachsen, 27.07.2016, 14:50 Uhr MESZ. Links: basierend auf kumulierten, mit einer Standard- $Z-R$ -Beziehung quantifizierten Fünfminutendaten; rechts: basierend auf angeeichten Stundensummen (RADOLAN-RW-Produkt). Man beachte die erheblichen lokalen Überschätzungen (teilweise größer 30 %) durch das Echtzeit-QPE im Bereich großer Intensitäten (Bildquelle: <http://www.kachelmannwetter.com>; Datenquelle: DWD).

sowie den beiden empirischen Koeffizienten  $a$  und  $b$  (beide dimensionslos). Meist wird die Reflektivität in der logarithmischen Einheit dBZ angegeben unter Nutzung der Beziehung:

$$Z_{dBZ} = 10 \cdot \log(a \cdot R^b) \quad (2.1.2)$$

Wesentlichen Einfluss auf die Wahl der empirischen Parameter  $a$  und  $b$  hat zunächst das Tropfenspektrum der Hydrometeore, welches von der Radarmessung *per se* nicht erfasst werden kann<sup>1</sup>. Dafür kommen sogenannte Distrometer<sup>2</sup> zum Einsatz. Oftmals werden aber im Echtzeitbetrieb Standard- $Z-R$ -Beziehungen verwendet (die dafür vom DWD empfohlene Methodik findet sich beispielsweise bei DWD, 2015). Das so erhaltene QPE weist aber – bezogen auf die Niederschlagsrate am Boden – durchaus Fehler in der Größenordnung von  $-100$  bis  $+50$  % auf (siehe auch Abbildung 2.1.1). Einen guten Überblick über Grundlagen, Theorie und Methoden der operationellen Radarmeteorologie bietet PETERS (2008).

Aufgrund der angesprochenen verfahrensbedingten Fehler gab es seither Bestrebungen, das initial durch Ra-

dar gewonnene QPE zu verbessern. Mit der Verfügbarkeit von Ombrometerdaten in naher Echtzeit haben sich vor allem sogenannte „Aneichverfahren“ etabliert. Das Ziel hierbei ist es – mit vielfältigen Methoden – unter Kenntnis der Bodenniederschläge am Punkt das primäre QPE zu verbessern und an den Bodenbeobachtungen zu konditionieren. Für Deutschland ist sicher das DWD-Verfahren RADOLAN (DWD, 2004) besonders hervorzuheben, welches mittlerweile eine Vielzahl von quantifizierten Radarprodukten bereitstellt. Auf Detailfragen der Radarmeteorologie, wie beispielsweise Messtechnik, Datenverarbeitung, Fehlerkorrektur, Aneichung, Merging etc. kann hierin nicht eingegangen werden; stattdessen soll auf die einschlägige Literatur verwiesen werden.

Dennoch an dieser Stelle kurz der Hinweis: die Stärken radarbasierter Verfahren in der Hydrometeorologie liegen ganz Eindeutig in der raum-zeitlich hoch aufgelösten Quantifizierbarkeit von Niederschlag (*das* schlagende Argument für den Einsatz solcherlei Produkte in der operationellen Hydrologie, insbesondere der kleinräumigen Hochwasservorhersage). Dennoch bedingt das indirekte Messprinzip natürlich zwangsläufig Quantifizierungsfehler. So ist allseits bekannt, dass radarbasierte QPEs häufig stratiforme Niederschläge unterschätzen (siehe dazu auch Abschnitt 6.3.4). Damit sind Radar-Niederschläge nur bedingt für klimatologische Untersuchungen geeignet, obgleich es aktuell beispielsweise seitens des DWD Bestrebungen gibt (DWD, 2016), auch auf Basis von Radardaten klimato-

<sup>1</sup>Einschränkend muss hier bemerkt werden, dass moderne Dualband-Radare es erlauben, die horizontale und vertikale Ausdehnung von Hydrometeoren abzuschätzen. Dualband-Daten sind damit durchaus für eine erste Hydrometeorklassifikation geeignet.

<sup>2</sup>Das Tropfenspektrum kann mit verschiedenen Verfahren ermittelt werden. Beispielsweise kommen bodengebundene Systeme zum Einsatz, bei denen eine Membran die Größe der auftreffenden Tropfen registriert („klassisches Distrometer“). Es gibt daneben eine Vielzahl weiterer Verfahren, z. B. auf Basis von Laser-Messungen, auf die hierin allerdings nicht eingegangen werden kann.

logisch gültige Aussagen abzuleiten (u. a. mit Blick auf Starkregenhäufigkeiten).

Die dritte Gruppe der Verfahren zur Ermittlung eines QPE wird von luft- und raumgestützten Fernerkundungsverfahren gebildet. Luftgestützte Verfahren sind eher experimenteller oder ereignisbezogener Natur (z. B. bei Wirbelstürmen) und beruhen meist ebenfalls auf Radarmessungen. Bei den raumgestützten Verfahren sind wiederum radarbasierte Sensoren wie TRMM-PR<sup>1</sup> oder GPM-DPR<sup>2</sup> anzutreffen. Generell ist aber die Genauigkeit solcher raumbasierter Radarmessungen im Vergleich zu terrestrischen Messungen als wesentlich geringer einzuschätzen; der Vorteil liegt hier klar im Abdecken sehr großer Bereiche sowie unzugänglicher, datenarmer Regionen der Erde.

Ein mittlerweile für langfristige wasserhaushaltliche Betrachtungen großer kontinentaler Einzugsgebiete interessante Mission stellt GRACE<sup>3</sup> dar, wo über die Messung von Änderungen des Erdschwerefeldes u. a. Rückschlüsse auf atmosphärische Feuchteflüsse und die klimatologische, raum-zeitliche Entwicklung von Niederschlägen möglich sind. Eine Nachfolgemission für GRACE ab 2017 ist in Planung.

Jedes Verfahren zur Ableitung eines QPE hat Vor- und Nachteile, welche im Lichte der operationellen Anforderungen für ein Hochwasservorhersagesystem besonders gewichtet werden müssen (siehe Tabelle 2.1.1). Jedes Verfahren wird andere Ergebnisse liefern (siehe Abbildung 2.1.2). Letztendlich ist und bleibt die wahre raum-zeitliche Verteilung des Niederschlags unbekannt! Allerdings ist unstrittig, dass die Verwendung von Radar-QPEs geradezu unabdingbar für operationelle hydrologische Anwendungen mit dem Fokus auf kleinen, schnell reagierenden Einzugsgebieten ist!

### 2.1.2 Verfahren der Niederschlagsvorhersage (QPF)

Die Erstellung einer quantitativen Niederschlagsvorhersage (oder Quantitative Precipitation Forecast – QPF) gehört zu den schwierigsten Aufgaben der Wettervorhersage. Hier-

für gibt es zwei Ursachen: Erstens ist Niederschlag keine raum-zeitlich kontinuierliche Feldgröße, wie beispielsweise die Temperatur oder der Luftdruck. Der Ort und die Zeit des Auftretens von Niederschlag sowie seine Menge sind mit deterministischen Methoden nur sehr schwer vorherzusagen. Die Vorhersagefehler steigen dabei mit zunehmender Vorhersageweite sowie mit stärkerer Lokalität und Intensität eines Ereignisses (also insbesondere für konvektive Starkregenerereignisse).

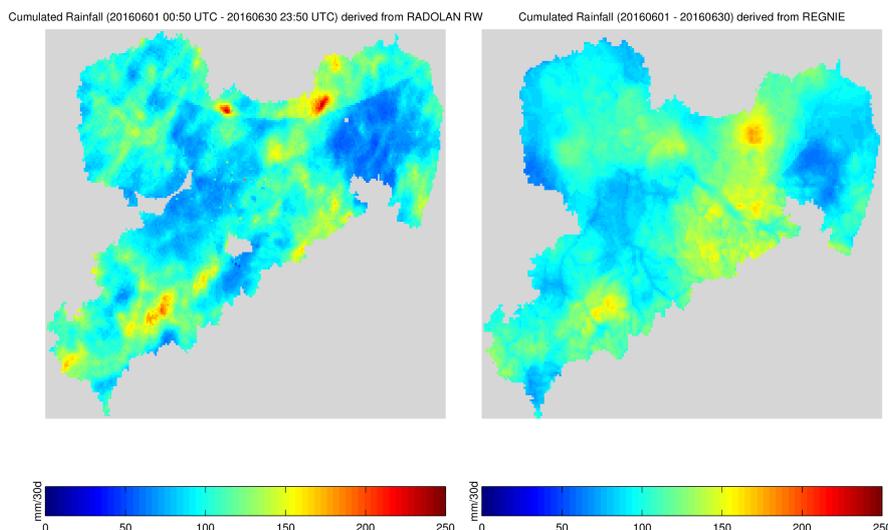
Die Zweite Ursache ist, dass bei den üblichen Methoden der Numerischen Wettervorhersage (oder Numerical Weather Prediction – NWP) der Niederschlag eine *diagnostische* und keine *prognostische Variable* ist. Konkret heißt das, dass er nicht direkt in den Modellgleichungen enthalten ist (wie im Gegensatz dazu Druck, Feuchte, Wind, Temperatur etc.), sondern Niederschlag mit eingebetteten Ansätzen („Mikrophysik“) modelliert werden muss. Das hat zur Folge, dass in den letzten Jahren mit besserer Verfügbarkeit von Rechenleistung sowie besserer numerischer Methoden sehr wohl die Vorhersage prognostischer Feldgrößen deutlich verbessert werden konnte, die eventuell zunächst simpel anmutende Vorhersage „Niederschlag am morgigen Tag: ja/nein?“ sich aber aus den vorgenannten Gründen heute mit NWP nicht wesentlich verlässlicher anstellen lässt, als vor 15 Jahren (BAUER ET AL., 2015). Vielmehr noch trifft das Gesagte auf die Vorhersage konkreter Mengen zu.

Aufgrund dieser fundamentalen Limitierungen und des generell erratischen Charakters von Niederschlag, versucht man durch die Verwendung von *Ensemble-Techniken* die Güte von Niederschlagsvorhersagen zu verbessern (siehe auch Abschnitt 2.5.2). In der Regel wird durch die Störung (Perturbation) von Anfangs- und Randbedingung des NWP-Systems versucht, die stochastische raum-zeitliche Entwicklung des Niederschlags in der Vorhersage besser zu repräsentieren. Die so gewonnenen *probabilistischen Vorhersagen* können unter Umständen einen prädiktiven Mehrwert verglichen mit deterministischer Modellierung liefern. Generell ist aber sowohl die Erstellung als auch die weitere Verarbeitung (z. B. als Antrieb für hydrologische Vorhersagen) von probabilistischen QPFs mit erheblichem Mehraufwand gegenüber einem deterministischen Vorgehen verbunden. Es ist daher aus Sicht der operationellen Hydrologie für konkrete Anwendungsfälle zu prüfen, ob eine probabilistische Vorhersagestrategie tatsächlich einen Nutzen bietet (für einen umfassenden Anwendungsfall aus Rheinland-Pfalz siehe beispielsweise BARTELS ET AL.,

<sup>1</sup>Precipitation Radar and Bord des Erdbeobachtungssatelliten TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission), welcher über 17 Jahre lang bis April 2015 im Dienst war.

<sup>2</sup>Die Nachfolgemission von TRMM wird durch den Satelliten GPM (Global Precipitation Measurement) geleistet, welcher neben einen Dualband-Radar mit einer Mikrowellenkamera ausgerüstet ist.

<sup>3</sup>Gravity Recovery And Climate Experiment.



**Abbildung 2.1.2:** Vergleich zweier 30-d-QPEs für Sachsen; links: auf Basis des RADOLAN-RW-Produkts; rechts: abgeleitet aus räumlich interpolierten Stationsdaten (REGNIE-Produkt). Zugrunde liegender Zeitraum: gesamter Juni 2016. Graue Patches innerhalb Sachsens repräsentieren Bereiche mit temporären Datenlücken. Bemerkenswert sind weiterhin eine Reihe von Artefakten im RADAR-QPE (Einsprengsel/Clutter, Unstetigkeiten an Kompositierungskanten).

**Tabelle 2.1.1:** Gegenüberstellung von Vor- und Nachteilen verschiedener Verfahren zur Ableitung eines QPE mit Blick auf die operationellen Anforderungen im Zusammenhang mit einem Hochwasservorhersagesystem.

Verfahren	Vorteile	Nachteile	Bewertung
Bodenmessung am Punkt	Hohe lokale Genauigkeit	Keine räumliche Information; braucht teures Messnetz	Unabhängig für Aneicherung von Radardaten
Bodengestützte Fernerkundung (z. B. Radar)	Hohe raum-zeitliche Auflösung	Quantifizierungsfehler	Unabhängig für operationelle hydrologische Anwendungen
Luft- oder raumgestützte Fernerkundung	Abdeckung großer Gebiete; Abdeckung entlegener Gebiete	Quantifizierungsfehler	Für operationelle hydrologische Anwendungen nicht geeignet

2016). Für das hierin ausgelegte Problem der Hochwasserfrühwarnung widmet sich Kapitel 7 intensiv ebendieser Fragestellung.

Die modernste Strömung bei der Niederschlagsvorhersage bilden sogenannte *Nowcasting-Verfahren*. Nowcasting basiert auf raum-zeitlich hoch aufgelösten Beobachtungsdaten und deren raum-zeitlicher Extrapolation, auch unter Nutzung aktueller NWP-Ergebnisse. Durch Nowcasting kann beim Niederschlag im Vorhersageweitenbereich von wenigen Stunden unter Umständen eine Verbesserung gegenüber NWP erzielt werden. Generell bleibt aber das Problem bestehen, dass rasche, nichtlineare Veränderungen in der Atmosphäre (z. B. das „Aufkeimen“ einer konvektiven Zelle) sehr schwer vorhersagbar sind. An dieser Stelle soll als Beispiel das DWD-Verfahren RADVOR (Ra-

darvorhersage; DWD, 2012) Erwähnung finden, welches raum-zeitlich hoch aufgelöste Niederschlagsvorhersagen für einen Vorhersagezeitraum von zwei Stunden bereitstellt. Verifikationsanalysen haben aber bisher keinen deutlichen objektiven prädiktiven Mehrwert des RADVOR-Produkts gegenüber NWP (konkret: DWD-LMK bzw. COSMO-DE) zeigen können. Weiterhin haben mittlerweile Ensemble-Techniken in das radarbasierte Niederschlags-Nowcasting Einzug gehalten (siehe z. B. TESSENDORF & EINFALT, 2011) und können mit Blick auf die Hochwasservorhersage für kleine Einzugsgebiete durchaus die Vorhersagegüte erhöhen (siehe beispielsweise LIECHTI ET AL., 2013).

**Schlussfolgerung 9:** Für eine Frühwarnung für kleine, schnell reagierende Einzugsgebiete ist die Einbeziehung von quantitativen Niederschlagsvorhersagen unumgänglich, um den Vorhersagezeitraum zu erweitern und somit überhaupt erst praktikable Vorwarnzeiten zu realisieren. Gleichsam ist die Vorhersage der raum-zeitlichen Niederschlagsverteilung mit sehr großen Unsicherheiten behaftet und wird es auch auf absehbare Zeit bleiben. Eine verlässliche, hydro-meteorologisch basierte Hochwasserfrühwarnung ist nur für einen Vorhersagezeitraum von wenigen Stunden möglich. Für größere Vorhersageweiten kann die Einbeziehung von Ensembles eine Möglichkeit sein, die Vorhersageunsicherheiten zumindest zu quantifizieren. ❖

## 2.2 Systematisierung von hydrologischen Modellansätzen zur Hochwasserfrühwarnung

Es gibt eine Reihe von Möglichkeiten, hydrologische Modellansätze zu systematisieren. Üblich ist beispielsweise eine Einteilung entsprechend des Grades der Kausalität. Dabei ist maßgeblich, wie stark die im Modell abgebildeten Naturprozesse vereinfacht sind. Zweckmäßig ist dabei eine dreigliedrige Unterscheidung in (1) deterministische Ansätze (also beruhend auf dem Versuch, die relevanten Vorgänge im betrachteten Hydrosystem mathematisch abstrahiert zu beschreiben), (2) datengetriebene Ansätze (hier spielt nur die Wirkung und nicht die Wirkungsweise des Systems eine Rolle – Black-Box-Ansätze) und (3) gewissermaßen nicht-kausale Ansätze, basierend auf Expertenwissen, Faustwerten und so weiter. Abbildung 2.2.1 liefert eine grafische Übersicht entsprechend dieser Einteilung. Eine ganz konkret auf die Vorhersagekonzepte für Flash Floods abgestellte Systematisierung nimmt HAPUARACHCHI ET AL. (2011) vor (siehe Abbildung 2.2.2); alle in Abschnitt 1.6 vorgestellten Frühwarnsysteme lassen sich hinsichtlich der zugrunde liegenden Methodik innerhalb dieser Systematik einordnen.

### 2.2.1 Deterministische Ansätze

Am häufigsten basiert die Frühwarnung vor Flash Floods auf einer Abflussvorhersage mittels deterministischer Modelle (siehe dazu auch Tabelle 1.6.1) – „Flow Forecast



**Abbildung 2.2.1:** Modellansätze mit potentieller Eignung für die Hochwasserfrühwarnung in kleinen, schnell reagierenden Einzugsgebieten. Der Grad an Kausalität nimmt von links nach rechts ab.

Model“ in Abbildung 2.2.2. Die Philosophie dabei ist, modellgestützt Abflussganglinien oder zumindest Scheitelabflüsse und/oder -wasserstände vorherzusagen. Diese werden entweder extremwertstatistisch eingeordnet und die Warnung auf dieser Basis abgeleitet (z. B. „erste Warnstufe ab einem zweijährlichen Ereignis“) oder aber, die Model- lergebnisse werden mit vorher festgelegten Warn- oder Alarmstufen abgeglichen. Beispiele für solcherlei vorgehen finden sich zahlreich in der Standardliteratur (ANDERSON & BURT, 1985; NEMEC JR., 1986; SENE, 2010; UCAR, 2010; WMO, 2011; MEYLAN ET AL., 2012; ADAMS & PANGANNO, 2016); auch die zuvor kurz porträtierten Systeme aus Baden-Württemberg, Hessen, Rheinland-Pfalz, der Schweiz sowie EFAS-ERIC lassen sich dieser Gruppe der auf Abflussvorhersagen basierenden Frühwarnungen zuordnen.

Eine Besonderheit bei der deterministischen Herangehensweise bei der Frühwarnung ist die bereits vorgestellte Flash Flood Guidance. Mit Hilfe eines deterministischen Modells<sup>1</sup> werden für ein bestimmtes Gebiet N-A-Simulationen mit variabler Niederschlagsbeaufschlagung sowie verschiedene Bodenfeuchtebedingungen durchgeführt. Die resultierenden Abflüsse werden gegen die antreibenden Niederschläge für verschiedene Andauern des Niederschlags aufgetragen; es ergeben sich Niederschlags-Abfluss-Kurven wie beispielsweise in Abbildung 2.2.3 zu sehen. Durch Festlegen eines kritischen Abflusses (z. B.

<sup>1</sup> Allein bezogen auf die Vereinigten Staaten gibt es dabei nicht *den* Ansatz; vielmehr findet ein breites Spektrum Anwendung – von einfachen, nicht flächendifferenzierten, konzeptionellen Modellen, bis hin zu rasterorientierten, physikalisch basierten Prozessmodellen. Details zum FFG-System – auch in seiner Vielgestaltigkeit – in den USA liefern u. a. CLARK ET AL. (2014).

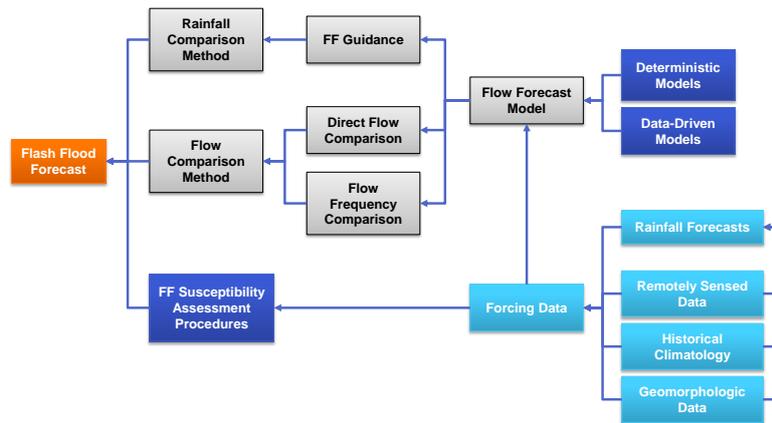


Abbildung 2.2.2: Konzepte zur Flash-Flood-Vorhersage, verändert nach HAPUARACHCHI ET AL. (2011). Die dunkelblauen Kästen repräsentieren die jeweiligen Modellansätze aus Abbildung 2.2.1.

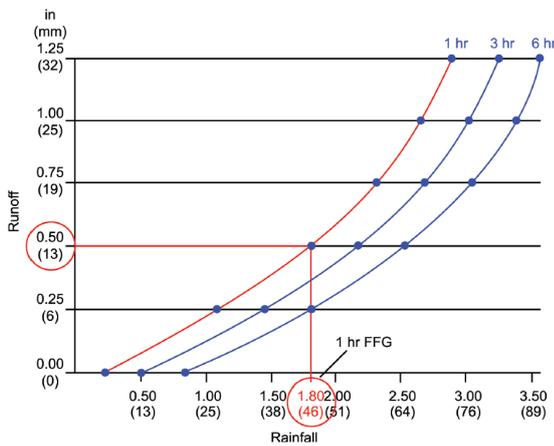


Abbildung 2.2.3: Illustration des Konzepts der Flash Flood Guidance. Das Diagramm zeigt die Abhängigkeit des Abflusses von der Niederschlagshöhe für verschiedene Andauern. Das Diagramm ist spezifisch für eine bestimmte Anfangsbodenfeuchte und einen bestimmten Ort/bestimmtes Gebiet. Abbildung entnommen aus UCAR (2010).

auf Basis extremwertstatistischer Erwägungen) kann dann bezogen auf eine bestimmte Anfangsbodenfeuchte für eine bestimmte Andauer die für diesen Abfluss kritische Niederschlagshöhe abgelesen werden. Somit ist es im operationellen Betrieb möglich, aus der aktuell bekannten Bodenfeuchte jene Niederschlagshöhe innerhalb eines bestimmten Zeitraumes zu ermitteln, welche zum Erreichen oder Überschreiten eines als kritisch definierten Abflusses führt. Das zugrunde liegende deterministische N-A-Modell muss demnach nicht operationell betrieben werden, was ein ganz wesentlicher Vorteil der FFG-Methodik ist!

## 2.2.2 Datengetriebene Ansätze

Neben deterministischen sind auch datengetriebene Ansätze<sup>1</sup> für die N-A-Modellierung und damit potentiell für die Erstellung von Abflussvorhersagen anwendbar. Bei der datengetriebenen Modellierung interessieren die Systemprozesse nicht; das Hydrosystem wird als "Black Box" modelliert und ein geeignetes Modell gesucht, um die nichtlineare funktionale Beziehung zwischen Antriebs- und Randbedingungsdaten sowie der Systemreaktionen (im vorliegenden Fall: des Abflusses) abzubilden. Damit umfasst diese Art von Ansätzen sowohl „klassische“ empirische Modelle (wie lineare oder nichtlineare Regressionsmodelle) als auch Soft-Computing-Verfahren, wie Fuzzy-Systeme oder Künstliche Neuronale Netze (KNN). Die Vielfalt der Verfahren, ihre Vor- und Nachteile sowie ihre Eignung spezifisch für den Einsatz zu operationellen Hochwasserfrühwarnung, soll und kann hier nicht besprochen werden; einen Überblick und schnellen Einstieg in die Thematik bieten beispielsweise CHANDWANI ET AL. (2015).

Aufgrund der Relevanz für das hierin beschriebene Vorhaben soll kurz die Arbeit von MATREATA & MATREATA (2006) hervorgehoben werden, welche für die operationelle Hochwasserfrühwarnung in unbeobachteten Gebieten einen Fuzzy-Logik basierten Ansatz zur Abschätzung der Hochwassergefährdung verwenden. Der Ansatz ist zweigliedrig; zunächst wird auf Basis beobachteter Niederschläge ein aktueller Bodenfeuchteindex ermittelt. In einem zweiten Schritt wird aus eben jenem Bodenfeuchteindex

<sup>1</sup>Bei dieser Bezeichnung wird „datengetrieben“ im Sinne von „rein datengetrieben“ verwendet.

sowie dem vorhergesagten Niederschlag (Andauer und Intensität) ein maximal zu erwartender Abfluss bestimmt. Das Ergebnis wird dabei nicht durch einen konkreten Zahlenwert, sondern als Zugehörigkeitsmaß zu verschiedenen Ergebnisklassen („sehr viel, viel, ..., wenig Abfluss“) repräsentiert; dem Ergebnis wohnt dadurch eine gewisse Unschärfe<sup>1</sup> inne. Wegen des geringen Datenbedarfs ist die Übertragung eines erstellten Modells auf unbeobachtete Gebiete durchaus möglich.

### 2.2.3 Bewertungsverfahren der Hochwasseranfälligkeit

Entsprechend der Einteilung von HAPUARACHCHI ET AL. (2011) wird – neben deterministischen und datengetriebenen Modellen – die dritte Gruppe von Ansätzen von sogenannten Flood Susceptibility Assessment Procedures gebildet (FSAPs – Bewertungsverfahren der Hochwasseranfälligkeit oder Hochwasserneigung); eine gute Übersicht hierzu liefert METZKES (2016). Das Prinzip von FSAPs ist es, mittels – im mathematischen Sinne – simpler, trennscharfer Klassifikation von morphologischen, topologischen, hydrologischen sowie beobachteten und/oder vorhergesagten meteorologischen Indikatoren, die aktuelle bzw. zu erwartende Hochwasserneigung eines bestimmten Gebietes abzuschätzen. Es gibt bei diesem Vorgehen durchaus Gemeinsamkeiten zu datengetriebenen Ansätzen; so bilden beispielsweise MATREATA & MATREATA (2006) eine vorgenannte indikatorbasierte Bewertung durch eine unscharfe Fuzzy-Logik-Klassifikation ab. Auf der anderen Seite werden mithin für die konkrete Bestimmung von Indikatoren komplexere Ansätze verwendet (z. B. für die Schätzung der aktuellen Bodenfeuchteverteilung, Niederschlagsschätzung und/oder -vorhersage usw.), was – betrachtet man alle potentiell im operationellen Einsatz nötigen Modellkomponenten – FSAPs unter Umständen formal den deterministischen Verfahren annähern kann. Oftmals werden auch einfache Klassifikationsverfahren mit Wichtungsfaktoren kombiniert, welche dann mathematisch gesehen als effektive Parameter das Verfahren zu einem Regressionsverfahren machen.

COLLIER & FOX (2003) schlagen eine zweistufige, punktebasierte Klassifizierung vor. Insgesamt wird die Hochwasserneigung anhand von 12 Einzelfaktoren bewer-

tet. Fünf Faktoren bilden dabei gewissermaßen zeitlich invariante morphologisch-topologische Einflüsse ab (die sogenannte „Baseline Susceptibility“). Konkret sind das: Geländegefälle, Flächen-Fließweg-Verhältnis, Versiegelungsgrad, Anteil schneller Abflusskomponenten am Gesamtabfluss sowie Grad der Einengung von Fließgewässern. Drei Faktoren bilden die hydrologische Vorgeschichte ab: vorausgegangene Dürre<sup>2</sup>, Vorfeuchte sowie Schneerücklage. Die restlichen vier Indikatoren repräsentieren die Niederschlagscharakteristik (Andauer, Intensitätsmaximum sowie Zugbahn und -geschwindigkeit konvektiver Zellen). Alle genannten Indikatoren werden mittels Expertenwissens auf einer Skala von 0 bis 4 bewertet. Es ergibt sich dann additiv die Abschätzung der aktuellen Hochwasserneigung entsprechend der Gesamtscores zu: „extrem“ (mehr als 30 Punkte), „hoch“ (mehr als 20) und „mittel“ (mehr als 15 Punkte). Das generelle Problem solch einer pauschalen Bewertung ist, dass unterschiedliche Einzugsgebiete unterschiedlich dynamisch auf Hochwasser generierende Antriebe reagieren. DALE ET AL. (2004) schlagen daher die Kombination des Verfahrens nach COLLIER & FOX (2003) mit Korrekturfaktoren vor. Wie bereits angesprochen ergibt sich so eine formale Annäherung des Ansatzes zu einem linearen Mehrfachregressionsmodell. Ein weiteres Problem ist, dass die Methodik von COLLIER & FOX (2003) bisher nicht operationell verifiziert wurde.<sup>3</sup>

MANI ET AL. (2012) stellen ein Bewertungsmodell („Dispositionsmodell“) für die Gefährdungsabschätzung durch Hochwasser und Murgänge in kleinen Einzugsgebieten vor. Ganz analog zu COLLIER & FOX (2003) unterscheiden sie dabei zwischen „statischer“ und „variabler“ Disposition, welche in Kombination die „aktuelle Disposition“ ausmachen. MANI ET AL. (2012) präsentieren zwei Methodiken für die Bestimmung der statischen Disposition. Zum einen eine mittels Expertenwissen erstellte „Abflussprozessstypenkarte“ nach SCHERRER & NAEF (2003),<sup>4</sup> zum anderen ein

<sup>2</sup>Dürre und Vorfeuchte wirken im vorgestellten Verfahren gleichsinnig; das ist nur scheinbar widersinnig, da eine vorangegangene Dürreperiode durchaus zu einer hohen Hydrophobizität des Bodens und dementsprechend einer Erhöhung des initialen Infiltrationswiderstandes führt. Bei Starkregen wird so auf stark trockenem Boden oftmals sehr dynamisch Oberflächenabfluss generiert.

<sup>3</sup>Zumindest ist dazu keine Literatur recherchierbar. Obgleich führen COLLIER & FOX (2003) aus, dass das Verfahren bei einzelnen regionalen Hochwasservorhersagezentralen im Vereinigten Königreich angewendet wird.

<sup>4</sup>Grundsätzlich ist das Vorgehen vergleichbar mit der WBS-FLAB-Methodik nach PESCHKE ET AL. (1999).

<sup>1</sup>Diese „Unschärfe“ soll bewusst *nicht* synonym mit dem Begriff „Unsicherheit“ genutzt werden (siehe auch Abschnitt 2.5.1).

Ansatz zur Ermittlung einer „Grunddisposition“ nach DOB-MANN (2009). Letzteres ist ein punktebasiertes Verfahren und ähnelt methodisch stark dem Vorgehen zur Ermittlung der „Baseline Susceptibility“ bei COLLIER & FOX (2003). Die variable Disposition ermitteln MANI ET AL. (2012) unter Nutzung eines flächendifferenzierten, physikalisch orientierten Wasserhaushaltsmodells (WaSIM-ETH); es werden modellierte Informationen zu Bodenwassergehalten sowie Schneespeicher mit bewertet. Weiterhin wird auf Basis von Radar-QPEs (siehe Abschnitt 2.1) ein Vorregenindex erstellt. Die variable und damit die aktuelle Disposition wird täglich neu bewertet; quantitative Niederschlagsvorhersagen gehen hingegen in die Bewertung nicht ein (siehe dazu auch die Ausführungen in Abschnitt 1.4).

Hierin wird das Prototyping, die vergleichende, verifizierende Anwendung sowie die Konzeption und Operationalisierung eines ganz ähnlichen Bewertungsverfahrens der Hochwasseranfälligkeit als methodische Basis zur Ableitung von Produkten zur Hochwasserfrühwarnung für kleine, schnell reagierenden Einzugsgebieten ausführlich besprochen (siehe dazu Kapitel 8 im Teil II). Veröffentlichungen dazu finden sich bereits mit METZKES (2016), KERL ET AL. (2016) sowie PHILIPP ET AL. (2016).

### 2.2.4 Vergleichende Bewertung der vorgestellten Antriebsdaten, Modelle sowie Bewertungsverfahren

HAPUARACHCHI ET AL. (2011) liefern eine vergleichende Bewertung (siehe Abbildung 2.2.4) der für eine Hochwasserfrühwarnung in Frage kommenden Antriebsdaten (siehe auch Abschnitt 2.1), von Modellen zur Abflussvorhersage sowie von Bewertungsansätzen gemäß Abbildung 2.2.2.

Was die Antriebsdaten angeht (Abbildung 2.2.4, links), ist es anerkannter Stand von Wissenschaft und Technik, dass nur unter Einbeziehung von quantitativen Niederschlagsvorhersagen ein ausreichend langer Vorhersagezeitraum für kleine Einzugsgebiete zu realisieren ist. Allerdings ist die derzeitige erreichbare Qualität von QPFs gleichzeitig am geringsten, verglichen mit Radar-QPEs oder konventionellen QPEs (siehe dazu auch Abschnitt 2.1).

Bezüglich der für die Ableitung einer Hochwasserfrühwarnung verwendbaren hydrologischen Modellansätze (Abbildung 2.2.4, Mitte) ergibt sich häufig eine wechselseitige Abhängigkeit zwischen der einfachen und robusten Anwendbarkeit einerseits und dem Kalibrier- oder Trainingsbe-

darf (und damit des Datenbedarfs) andererseits; während datengetriebene Modelle zwar leicht aufstell- und anwendbar sind, so sind sie teilweise aufwändig in der Kalibrierung/Training.<sup>1</sup> Physikalisch basierte Einzugsgebietsmodelle hingegen verwenden bestenfalls nur eine geringe Anzahl an effektiven<sup>2</sup> Parametern, sind aber zunächst schwer aufzustellen und im operationellen Betrieb aufwändig zu beherrschen.

Die möglichen Vorgehensweisen bei der eigentlichen Bewertung der Vorhersagen als Grundlage einer Warnung (Abflussvergleich, Niederschlagsvergleich, Verfahren zur Abschätzung der Hochwasserneigung; Abbildung 2.2.4, rechts) weisen ebenfalls unterschiedliche zu erwartende Güten in Abhängigkeit von ihrer operationellen Nutzbarkeit auf. Beispielsweise sind Verfahren zur Bewertung der Hochwasseranfälligkeit (Flood Susceptibility Assessment Procedures) wenig datenhungrig, allerdings auch recht generell.

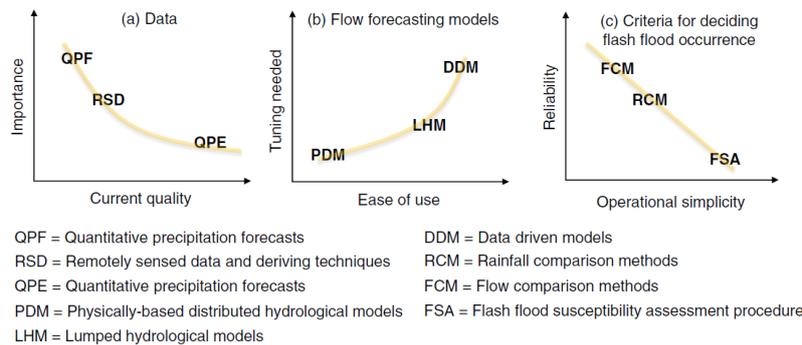
**Schlussfolgerung 10:** *Zur Hochwasserfrühwarnung können alle verfügbaren hydrologischen Modellansätze/-philosophien – von aufwändiger, flächendifferenzierter Prozessmodellierung bis hin zu einfachen Bewertungsverfahren – zum Einsatz kommen. Dabei gebietet das Prinzip der Parsimonie die Wahl desjenigen Modellansatzes, welcher so einfach wie möglich und so komplex wie nötig ist. Diese Wahl kann a priori nicht getroffen werden, was die vergleichende Untersuchung verschiedener Ansätze motiviert. Das Gesagte trifft gleichsam für die meteorologischen Antriebsdaten zu.* ❖

## 2.3 Typisches operationelles Vorhersage-Setup; Assimilation, Nachführung, Fehlerkorrektur

Wie bereits in Abschnitt 1.3 ausgeführt, besteht ein typisches operationelles System zur Abfluss- bzw. Wasserstandsvorhersage – was wiederum Grundlage für eine vorhersagebasierte Frühwarnung sein kann – aus verschiedenen Komponenten (siehe auch ANDERSON & BURT, 1985;

<sup>1</sup>Wichtig ist hier die Beachtung des Prinzips der Parsimonie – auch Ockhams Rasiermesser/Occam's Razor (nach Wilhelm von Ockham, 1288–1347) oder Sparsamkeitsprinzip genannt; ein Modell sollte so einfach wie möglich und nur so komplex wie nötig sein.

<sup>2</sup>Parameter, welche nicht direkt in der Natur bestimmbar sind, sondern kalibriert („geeicht“) werden müssen.

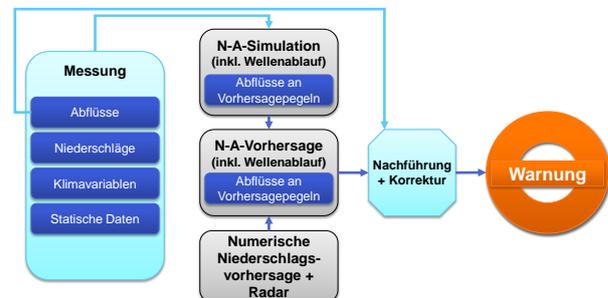


**Abbildung 2.2.4:** Vergleichende Bewertung der vorgestellten Antriebsdaten, Modelle sowie Bewertungsverfahren (siehe Abbildung 2.2.2). Abbildung entnommen aus HAPUARACHCHI ET AL. (2011).

NEMEC JR., 1986; SENE, 2010; WMO, 2011; ADAMS & PAGANO, 2016). An dieser Stelle soll etwas näher auf solch ein operationelles Vorhersage-Setup eingegangen werden, welches in Abbildung 2.3.1 prinzipiell dargestellt ist.

Mathematisch gesehen ist die operationelle N-A-Modellierung ein *Anfangs-Randwertproblem*<sup>1</sup>; hydrologisch relevante raum-zeitlich abhängige Variablen<sup>2</sup> (wie Niederschlag, Abfluss, Temperatur etc.) sowie lediglich räumlich abhängige Veränderliche<sup>3</sup>, wie Landnutzung, Geländegefälle etc. müssen erfasst, aufbereitet und der Modellierung zugänglich gemacht werden. Das geschieht durch Messung; raum-zeitlich variable Größen (wie beispielsweise Niederschlag und Abfluss) werden dabei üblicherweise über Messnetze (z. B. Pegelmessnetz, Ombrometermessnetz) und/oder Fernerkundungsmethoden (wie z. B. „Regenradar“) quantitativ erfasst.

Messdaten, welche die Anfangsbedingung ausmachen, werden an bestimmten Punkten in Raum und Zeit erhoben, weisen also auch nicht zwangsläufig eine fixe raum-zeitliche Auflösung auf. Weiterhin sind Messdaten stets fehlerbehaftet. Ein hydrologisches Modell benötigt wiederum – je nach Modelltyp und -setup – diese Daten in einer anderen raum-zeitlichen Auflösung (oder mit anderen Worten, an anderen Punkten in Raum und Zeit). Dazu muss



**Abbildung 2.3.1:** Schema eines typischen operationellen hydrologischen Vorhersage-Setups.

eine *Schätzung* der Werte der Messdaten an eben jenen Punkten vorgenommen werden um daraus einen möglichst realistischen Anfangszustand als Ausgangspunkt der Modellierung zu gewinnen. Solch eine Schätzung wird auch als *Datenassimilation* bezeichnet.

Bevor ein hydrologisches Modell operationell eingesetzt werden kann, muss es jedoch – auf Basis möglichst umfassender Daten – kalibriert werden, d. h., Prozess- und Modellparameter<sup>4</sup> müssen so eingestellt<sup>5</sup> werden, dass eine oder mehrere gewünschte Zielgrößen (in der Regel der an einem bestimmten Pegel beobachtete Abfluss) durch die Transformation der Inputparameter (also der Antriebsdaten) im Modell möglichst optimal abgebildet werden. Hier

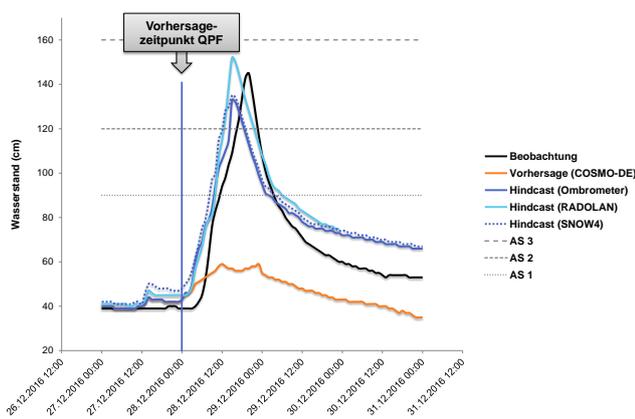
<sup>1</sup>Anfangswerte sind u. a. Durchflüsse zum Vorhersagezeitpunkt oder aktuelle Speicherfüllungen/Bodenfeuchten; konkret müssen alle im Modell vorkommenden abhängigen Variablen zu Beginn der Simulation mit einem Wert belegt werden. Randwerte sind beispielsweise die für den Vorhersagezeitraum vorliegenden Niederschlagsvorhersagen.

<sup>2</sup>Dem gegenüber steht der Begriff der „unabhängigen Variablen“. Für Naturprozesse sind das in der Regel Raum/Ort und Zeit(-punkt).

<sup>3</sup>Streng genommen, sind die wenigsten abhängigen Hydrosystemvariablen zeitlich invariant. Hier sollen jene als zeitveränderlich betrachtet werden, welche diese Veränderungen verhältnismäßig dynamisch erfahren können.

<sup>4</sup>Typische Prozessparameter in hydrologischen Modellen sind u. a. Speicherkonstanten, hydraulische Leitfähigkeiten, Grenztemperaturen usw. Typische Modellparameter sind beispielsweise die zeitliche Auflösung der Berechnung oder ein Iterations-Konvergenzkriterium.

<sup>5</sup>Dieses „Einstellen“ vollzieht sich in der Regel als Lösung eines nicht-linearen, mehrdimensionalen Optimierungsproblems, nämlich durch Variation von Parametern den Modelloutput möglichst gut an eine Referenz anzunähern. Dabei ist nicht nur die Wahl des Optimierungsverfahrens wichtig, sondern auch und vor allem die Formulierung der Zielfunktion unter Einbeziehung geeigneter Gütemaße.

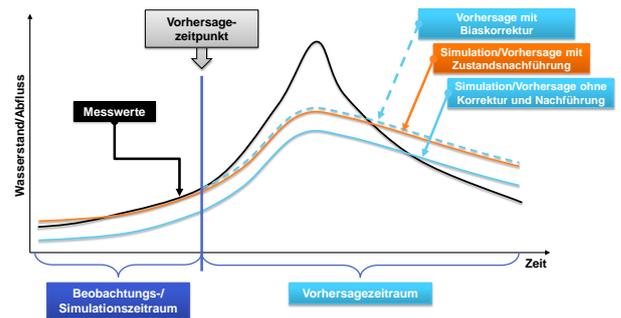


**Abbildung 2.3.2:** Hindcasting-Analyse für den Pegel Radeberg ( $A_E$  ca.  $113 \text{ km}^2$ ), Ereignis 28.12.2016. Dargestellt ist die operationelle Vorhersage des LHWZ (HBV-Modell), angetrieben mit (interpolierten) Ombrometerdaten als QPE sowie COSMO-DE-Daten als QPF (orange Linie; Vorhersagezeitpunkt: 28.12.2016, 00:00 UTC) sowie verschiedene, retrospektiv erstellte Nachhersagen (Hindcasts) auf Basis diverser QPEs. Es sind lediglich drei von vier Alarmstufen-Richtwerten dargestellt. Ergebnisse ohne Biaskorrektur und Nachführung.

handelt es sich also um eine N-A-Simulation (im Gegensatz zu einer N-A-Vorhersage); das Modell wird *diagnostisch* betrieben.

Im Vorhersagefall wird das bereits kalibrierte N-A-Modell dann *prognostisch* eingesetzt, das heißt, das Modell wird nicht mit beobachteten Daten für vergangene Zeitabschnitte, sondern mit vorhergesagten (also für die Zukunft gültigen) Daten angetrieben. Eine Sonderform der Vorhersage ist der sogenannte *Hindcast* („Nachhersage“). Hier wird das Modell zwar diagnostisch verwendet, es werden aber für den in der Vergangenheit liegenden Simulationszeitraum gültige Vorhersagedaten zum Antrieb verwendet. Solcherlei Vorgehen ist zweckmäßig, um beispielsweise die Vorhersagegüte retrospektiv via eines Vergleichs mit nunmehr bekannten Messdaten (z. B. des Abflusses) bewerten zu können (siehe Abbildung 2.3.2).

In den seltensten Fällen wird ein prognostisch eingesetztes hydrologisches Modell sowohl im Simulationszeitraum („Vergangenheit“) als auch im Vorhersagezeitraum („Zukunft“) die tatsächlich ablaufenden/beobachteten Pro-



**Abbildung 2.3.3:** Vorhersage ohne/mit Biaskorrektur/Zustandsnachführung zur Anpassung der Modellergebnisse an Beobachtungswerte mit dem Ziel der Verbesserung der Ergebnisgüte.

zessverläufe exakt abbilden können.<sup>1</sup> Um das Modellergebnis besser an bekannte Beobachtungsdaten anzupassen verwendet man Verfahren der *Fehlerkorrektur* („Bias Correction“) und/oder der *Nachführung* von Zustandsgrößen („State Updating“). Abbildung 2.3.3 zeigt qualitativ den Einfluss der Verfahren auf die Modellergebnisse.

Die Fehlerkorrektur bedient sich dabei eines meist einfachen mathematischen additiven oder multiplikativen Verfahrens, welches zum Ziel hat, die Simulation an bereits beobachtete Messwerte anzubinden. Im einfachsten Falle wird der Differenzbetrag zwischen Simulation und Beobachtung zum Vorhersagezeitpunkt additiv auf das gesamte Modellergebnis (also auf Simulations- sowie Vorhersageergebnisse) angewendet (strichlierte hellblaue Linie in Abb. 2.3.3). Aber es sind auch Korrekturen in der Zeitdimension verbreitet, beispielsweise um eine ungünstige Phasenlage („Timing“) beobachteter zu simulierten Peaks zu verbessern.

Ein typisches deterministisches hydrologisches Modell bildet Naturvorgänge mehr oder weniger stark abstrahiert, konzeptionell oder physikalisch basiert ab.<sup>2</sup> Dabei werden Modellteile wie beispielsweise Einzellinearspeicher (ELS) verwendet. Das Standardmodell des ELS besitzt zwei Prozessparameter, nämlich die sog. Rückgangskon-

<sup>1</sup>Die Ursache hierfür ist das Vorhandensein vielfältiger Fehler; üblicherweise unterscheidet man (1) *Datenfehler* (z. B. durch Messfehler, unzulängliche Datenassimilation, zu wenig Messdaten etc.), (2) *Modellfehler* (Fehler, welche aus der unzureichenden Abbildung der Natur mittels eines abstrakten Modells herrühren) sowie (3) *numerische Fehler*, die dadurch entstehen, dass in der Regel approximative Verfahren bei der Lösung der Gleichungen des mathematischen Modells zum Einsatz kommen (z. B. numerische Integration oder Iteration).

<sup>2</sup>Siehe dazu auch Abschnitt 2.2.

stante<sup>1</sup> sowie sein Gesamt- oder Maximalvolumen<sup>2</sup>. Die eigentliche aktuelle Füllung des ELS wiederum ist eine abhängige Variable (oder Zustandsgröße). Der Wert dieser abhängigen Variable muss zu Beginn jedweder Modellrechnung (gleich ob Simulation oder Vorhersage) belegt sein. Wie bereits ausgeführt ist es das Ziel der Datenassimilation, für jeden im Modell abgebildeten Punkt im Raum den Wert u. a. dieser Variable bereitzustellen. Natürlich wird das nur bedingt gelingen, da es sich beim ELS-Modell um ein stark abstrahiertes, konzeptionelles Abbild der Realität handelt und demnach die „Anfangsfüllung“ in der Natur nicht existiert und damit nicht messbar ist. Allerdings hat die Speicherfüllung einen nicht unerheblichen Einfluss auf das Modellverhalten und damit die Modellergebnisse bzw. die Vorhersagegüte. Ziel der Nachführung ist es nun, die Schätzung solcherlei Zustandsgrößen zu verbessern (LIS-NIAK ET AL., 2014).

Praktisch geht man häufig so vor, dass das Modell auch für einen Zeitraum vor dem eigentlichen Vorhersagezeitpunkt betrieben wird („Simulation“ – siehe Abb. 2.3.3). Die für diesen Zeitraum erhaltenen Modellergebnisse werden dann zur vorliegenden Beobachtung in Beziehung gebracht und die Schätzung von Zustandsgrößen systematisch verbessert, d. h., mit dem Ziel die Modellergebnisse im Simulationszeitraum der Beobachtung anzunähern (orangefarbene Linie in Abb. 2.3.3). Methodisch kann das händisch, optimierungsbasiert, oder durch Verwendung spezieller Filter zur Zustandsschätzung (z. B. Kalman-Filter) erfolgen.

Der letzte Schritt gemäß Abbildung 2.3.1 ist die Ableitung der eigentlichen Warnung (bzw. von Warnprodukten) auf Basis der hydrologischen Modellergebnisse. Dabei sollten die Vorhersageergebnisse nicht einfach direkt in Warnungen übersetzt werden. Vielmehr sollten sich Vorhersagegüte und zu erwartende Unsicherheiten im Warnprodukt niederschlagen. Im Idealfall kann und sollte eine Experteneinschätzung in die Warnung eingehen. Darüber hinaus sollte ein Warnprodukt Informationen enthalten, welche nicht automatisch mittels eines Vorhersagemodells generiert werden können, z. B. eine verbale Beschreibung der Lage sowie der erwarteten weiteren Entwicklung der Gefährdung. Mit der Ableitung von Warnprodukten auf Ba-

sis hydro-meteorologischer Vorhersagen befasst sich Abschnitt 2.7.

**Schlussfolgerung 11:** Die hydrologische Vorhersage ist ein Anfangs-Randwertproblem. Anfangswerte (Zustände zu Beginn des Vorhersagezeitraums) sowie Randwerte (z. B. Niederschlagsvorhersagen) sind mit Fehlern behaftet. Mit diesen Fehlern sollte mittels Verfahren der Datenassimilation, Fehlerkorrektur und Nachführung umgegangen werden, um die Vorhersagegüte zu verbessern. ❖

## 2.4 Quantitative Bewertung von Vorhersagen

Nur durch eine objektive (quantitative)<sup>3</sup> Bewertung von Vorhersagen ist der Vergleich verschiedener Vorhersageprodukte sowie eine zielgerichtete Methodenentwicklung erst möglich. Wird dabei ein bestimmtes Produkt – beispielsweise eine Niederschlagsvorhersage – untersucht und seine Vorhersagegüte bewertet, so spricht man von *Verifikation*. Wird hingegen untersucht, wie gut ein Modell (angetrieben wiederum durch bestimmte „Produkte“) einen Naturvorgang abbilden kann (beispielsweise, wie gut ein hydrologisches Modell eine beobachtete Ganglinie simuliert), so handelt es sich dabei um eine *Validierung*. Untersucht man allerdings die Treffsicherheit der auf Basis des hydrologischen Modells abgeleiteten Warnungen (z. B. vorhergesagter Wasserstand erreicht oder nicht), dann handelt es sich wiederum um eine *Verifikation*.

Ganz generell gibt es Verfahren, welche eine ereignisbasierte, kategorielle (dichotome) Bewertung vornehmen sowie Verfahren, welche den (meist zeitlichen) Verlauf einer vorhergesagten Größe beurteilen. Weiterhin unterscheiden sich Verfahren abhängig davon, ob deterministische oder probabilistische Vorhersagen (meist Ensembles) untersucht werden sollen. Hier werden nun – dieser Unterscheidung folgend – die wichtigsten quantitativen Bewertungsverfahren vorgestellt.

<sup>1</sup>Will man das ELS-Modell mit einem einfachen Gefäß mit horizontalem Auslass an der tiefsten Stelle versinnbildlichen, handelt es sich bei der Rückgangskonstante um ein Maß für den Durchmesser des Auslasses.

<sup>2</sup>Die Größe bzw. das Fassungsvermögen des Gefäßes.

<sup>3</sup>Nichtsdestotrotz sind qualitative Ansätze für die Bewertung von Vorhersagen ebenfalls wichtig. Als Beispiele seien hier genannt Summenlinien, Quantil-Quantil-Plots, Scatterplots usw. Siehe dazu auch Kapitel 6.

**Tabelle 2.4.1:** Beispiel einer Kontingenztabelle (FAWCETT, 2006).

		Beobachtung	
		Ja	Nein
Ereignis vorhergesagt	Ja	True Positives	False Positives
	Nein	False Negatives	True Negatives
Summe		P	N

### 2.4.1 Dichotome Bewertung<sup>1</sup>

Eine dichotome Bewertung kennt zwei mögliche Ausgänge: Treffer oder kein Treffer. Bezogen auf Vorhersagen heißt das: Vorhersage eingetreten oder Vorhersage nicht eingetreten. Die Bewertung erfolgt also kategoriell und ereignisbasiert; das geschieht mit Hilfe einer *Kontingenztabelle* (siehe Tabelle 2.4.1 als Beispiel).

Die Herleitung der Kontingenztabelle erfolgt nach einem festen Schema: Zunächst wird ein Grenzwert definiert, anhand dessen die Vorhersage („Ereignis vorhergesagt“) und die Beobachtung („Ereignis beobachtet/eingetreten“) – beispielsweise Niederschlag – in zwei Klassen unterteilt werden (jeweils ja/nein und positiv/negativ). Zum Beispiel wird eine Niederschlagssumme von 10 mm in 6 h als Schwellenwert definiert. Im folgenden Schritt werden Vorhersage und Beobachtung zeitschrittweise verglichen. Als *True Positive* (TP) oder *True Negative* (TN) sind all diejenigen Zeitschritte zu zählen, an denen Beobachtung und Vorhersage gleichsinnig den Schwellenwert über- (ja, positiv) oder unterschreiten (nein, negativ). Als *False Negatives* (FN) sind jene Zeitschritte zu zählen, an denen der Schwellenwert durch die Beobachtung überschritten und durch die Vorhersage unterschritten wird (nein, positiv). Der entgegengesetzte Fall ist als *False Positive* (FP) zu werten (ja, negativ).

Anhand der Kontingenztabelle lassen sich nun eine Vielzahl an Maßzahlen berechnen, von denen hier aber lediglich einige beschrieben werden sollen. Die *Probability of Detection* (POD) oder *True Positive Rate* (TPR) ist der Anteil an Schwellenwertüberschreitungen, die durch das Vorhersageprodukt richtig erkannt werden. Dieses Maß stellt somit den Nutzen des Vorhersageproduktes dar. Im Gegensatz dazu gibt die *False Positive Rate* (FPR) den Anteil an Schwellenwertüberschreitungen an, die durch das Vorhersageprodukt als solche erkannt jedoch nicht beobachtet wurden. Die False Positive Rate kann demnach auch

als Kosten des Vorhersageproduktes interpretiert werden. Die TPR und FPR berechnen sich wie folgt:

$$TPR = \frac{TP}{P} \tag{2.4.1}$$

$$FPR = \frac{FP}{N} \tag{2.4.2}$$

Die Frage danach, wie gut vorhergesagte Ereignisse (beispielsweise Schwellenwertüberschreitungen) mit beobachteten Ereignissen korrespondieren, wird häufig durch den *Critical Success Index* (CSI; auch bekannt als „Threat at Score“) ausgedrückt, welcher Werte zwischen 0 und 1 annehmen kann und sein Optimum bei 1 hat:

$$CSI = \frac{TP}{TP + FN + FP} \tag{2.4.3}$$

Ein weiteres und häufig genutztes Maß ist der *Equitable Threat Score* (ETS). Dieser berechnet sich als Anteil der richtig vorhergesagten Schwellenwertüberschreitungen an allen vorhergesagten und beobachteten Überschreitungen. Die Besonderheit des ETS liegt darin, dass die Anzahl der True Positives um jene Anzahl an True Positives, welche durch eine rein zufallsbasierte Vorhersage (TP(rand)) erzielt werden können, korrigiert wird:

$$ETS = \frac{TP - TP(rand)}{TP + FN + FP - TP(rand)} \tag{2.4.4}$$

wobei sich TP(rand) ergibt zu:

$$TP(rand) = \frac{(TP + FP) \cdot (TP + FN)}{TP + TN + FP + FN} \tag{2.4.5}$$

Der Wertebereich erstreckt sich von  $-\frac{1}{3} \leq ETS \leq 1$ , wobei ein ETS von 1 als optimal gilt. Eine Vorhersage mit einem ETS von  $\leq 0$  ist hinsichtlich ihrer Güte mit einer rein zufallsbasierten Vorhersage gleichzusetzen.

Eine Möglichkeit Nutzen und Kosten des Vorhersageproduktes zusammenschauend darzustellen ist die *Receiver Operating Characteristic* (ROC). Der sogenannte ROC-Space spannt sich zwischen der False Positive Rate auf der Abszisse und der True Positive Rate auf der Ordinate auf. Die TPR kann auch als *Sensitivität*, das Reziproke der FPR als *Spezifität* interpretiert werden. Jedes Klassifikationsergebnis – beispielsweise ein hinsichtlich eines bestimmten Schwellenwertes bewertetes Vorhersageprodukt – lässt sich als Punkt im ROC-Space darstellen (siehe Abbildung 2.4.1). Verschiedene Vorhersageprodukte

<sup>1</sup> Abschnitt übernommen aus KERL & PHILIPP (2015).

können mit Hilfe ihrer relativer Lage zueinander bewertet werden.

Der optimale Punkt im ROC-Space ist durch maximale True Positive Rate (TPR = 1) und minimale False Positive Rate gekennzeichnet (FPR = 0). Das wiederum bedeutet, dass ein Punkt im ROC-Space als besser zu bewerten ist, wenn er nordwestlich eines anderen Punktes liegt. Die Diagonale mit  $y = x$  (gestrichelte Linie in Abb. 2.4.1) stellt eine wichtige Grenze im ROC-Space dar. Während Klassifikatoren die sich oberhalb dieser Linie befinden einen prädiktiven Nutzen haben, ist der Nutzen von unterhalb dieser Linie liegenden Klassifikatoren mit einem rein zufallsbasiertem Klassifikator gleichzusetzen (BROWN ET AL., 2004; FAWCETT, 2006). Mit anderen Worten, hat das untersuchte Verfahren dann im Vergleich zu einem rein zufallsbasierten Vorhersagesystem (z. B. „würfeln“) keinen prädiktiven Nutzen mehr.

Im Fall der vorliegenden Studie ist u. a. die Modellgüte der Vorhersageprodukte in Abhängigkeit verschiedener Niederschlagsintensitäten von Interesse. Methodisch werden dazu verschiedene Schwellenwerte definiert, für die jeweils eine Kontingenztabelle aufgestellt wird und TPR sowie FPR berechnet werden. Folglich wird für jedes Vorhersageprodukt eine sogenannte *ROC-Curve* mit gleich vielen Stützstellen wie definierten Schwellenwerten erstellt (siehe Abb. 2.4.1). Das Integral unter der ROC-Curve ist die sogenannte AUC (*Area Under Curve*). Die AUC hat einen Wertebereich von 0 bis 1, wobei für Werte  $AUC > 0,5$  ein prädiktiver Nutzen vorliegt. Die AUC ist damit eine geeignetes Werkzeug, um anhand eines über alle relevanten Schwellenwerte integralen Maßes die Vorhersagegüte verschiedener QPFs miteinander vergleichen zu können.

## 2.4.2 Deterministische Gütemaße

Deterministische Gütemaße basieren auf einem integrierenden Vergleich von Vorhersage (oder Simulation) mit einer Referenz (meist der Beobachtung) – sie bewerten also den Vergleich von (stetigen) Zeitreihendaten. Dabei spielt das zeitliche Auftreten der Werte eine Rolle. Hier sollen kurz die wichtigsten und im weiteren zur Verwendung kommenden Gütemaße vorgestellt werden.

### Mittlerer absoluter Fehler oder Mean Absolute Error (MAE), (Normalized) Root Mean Square Error (nRMSE) sowie Multiplicative Bias (mBIAS)

Der MAE misst die mittlere absolute Abweichung zwischen Vorhersage und Beobachtung (meist auf Basis von Zeitreihendaten) und berechnet sich wie folgt:

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\mathcal{V}_i - \mathcal{B}_i| \quad (2.4.6)$$

mit den Vektoren von Vorhersage und Beobachtungen ( $\mathcal{V}$  und  $\mathcal{B}$ ) sowie dem Umfang der Daten  $n$ . Aufgrund der Betragsbildung wird die Richtung von Abweichungen zwischen Vorhersage und Beobachtung nicht erfasst.

Der (normalisierte) Root Mean Square Error oder (n)RMSE gewichtet Abweichungen hingegen quadratisch, was das Maß sensitiver für größere Differenzen zwischen Vorhersage und Beobachtung macht:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\mathcal{V}_i - \mathcal{B}_i)^2}{n}} \quad (2.4.7)$$

Wird der RMSE mit der Spannweite der Beobachtungsdaten normiert, erhält man den nRMSE. Dadurch wird die Vergleichbarkeit über unterschiedliche Wertebereiche hinweg (z. B. bei der Bewertung unterschiedlicher Datensätze) verbessert.

Der mBIAS ist das Verhältnis bzw. der Quotient der arithmetischen Mittelwerte von Vorhersage und Beobachtung:

$$\text{mBIAS} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathcal{V}_i}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathcal{B}_i} \quad (2.4.8)$$

Dabei drückt sich die Richtung der Abweichung der Mittelwerte im Vorzeichen des mBIAS aus; sein Optimum liegt bei eins.

### Nash-Sutcliffe-Effizienz (NSE) und Kling-Gupta-Effizienz (KGE)

In der Hydrologie ist die Nash-Sutcliffe-Effizienz (NSE) sehr gebräuchlich (NASH & SUTCLIFFE, 1970). Sie wird häufig zur Bewertung des prädiktiven Nutzens eines hydrologischen Modells verwendet und ergibt sich zu:

$$\text{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\mathcal{B}_i - \mathcal{V}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\mathcal{B}_i - \bar{\mathcal{B}})^2} \quad (2.4.9)$$

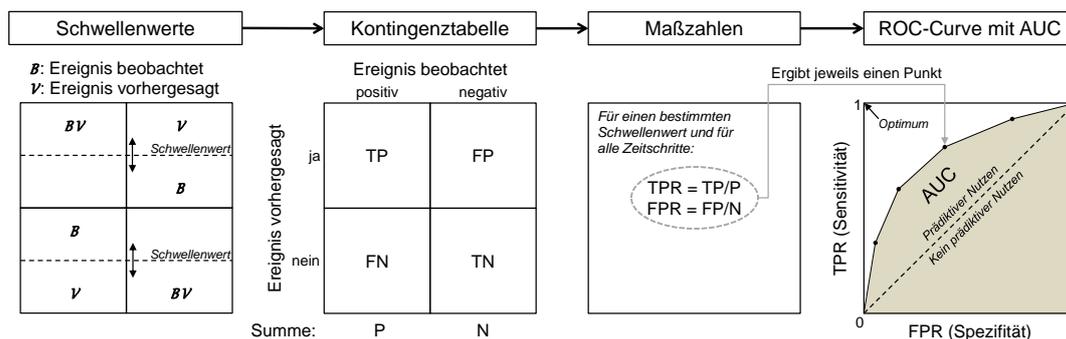


Abbildung 2.4.1: Schritte zur Ableitung von Punkten im ROC-Space sowie einer ROC-Curve.

mit dem Mittelwert der Beobachtungen  $\bar{B}$ . Damit stellt der NSE eine Normierung des mittleren quadratischen Fehlers mit der Standardabweichung dar.

Der Wertebereich des NSE liegt zwischen  $-\infty$  und 1, wobei ein Wert von  $NSE = 1$  das Optimum darstellt. Für Werte  $NSE = 0$  weist das betrachtete Modell keinen prädiktiven Nutzen im Vergleich zu einer klimatologischen Vorhersage anhand des Mittelwertes der Beobachtungen ( $V_i \leftarrow \bar{B}$ ) auf; für  $NSE < 0$  ist die Modellvorhersage gar schlechter, als die Mittelwertvorhersage. Der NSE hat einige Nachteile, welche ausführlich von GUPTA ET AL. (2009) besprochen werden.

Aufgrund der Nachteile des NSE schlagen GUPTA ET AL. (2009) und KLING ET AL. (2012) das folgende (auf der Euklidischen Distanz beruhende) Effizienzmaß vor:

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\delta - 1)^2 + (\nu - 1)^2} \quad (2.4.10)$$

mit  $r$ , dem linearen Korrelationskoeffizient zwischen Vorhersage und Beobachtung:

$$r = \frac{\text{Cov}(V, B)}{\sigma(V)\sigma(B)} \quad (2.4.11)$$

und  $\delta$ , dem Verhältnis zwischen den vorhergesagten und den beobachteten Daten (sogenannte „Bias Ratio“):

$$\delta = \frac{\bar{V}}{\bar{B}} \quad (2.4.12)$$

sowie dem Verhältnis der Variationskoeffizienten von Vorhersage und Beobachtung  $\nu$  („Variability Ratio“):

$$\nu = \frac{\text{Var}(V)}{\text{Var}(B)} = \frac{\frac{\sigma(V)}{\mu(V)}}{\frac{\sigma(B)}{\mu(B)}} \quad (2.4.13)$$

mit den jeweiligen Standardabweichungen  $\sigma$  sowie Erwartungswerten  $\mu$ , letztere in der Regel geschätzt via des arithmetischen Mittels.

Die KGE und ihre drei Komponenten ( $r, \delta, \nu$ ) haben ihr Optimum bei  $KGE = 1$ . Meist korrelieren NSE und KGE sehr stark. Allerdings ist die KGE abhängig vom ungünstigsten (also kleinsten) Wert ihrer drei Komponenten. Da für unterschiedliche hydrologische Anwendungen unterschiedliche Komponenten wichtiger sind (z. B. für Wasserhaushaltsbetrachtungen  $\delta$ , für Hochwassersimulationen  $r$  und  $\nu$ ) können leicht zusätzliche Skalierungen eingeführt werden.

### 2.4.3 Gütemaße und Werkzeuge zur quantitativen Bewertung probabilistischer Modellergebnisse

Die quantitative, vergleichende Bewertung probabilistischer Vorhersagen bzw. probabilistischer Modellergebnisse erfordert geeignete Maße und Werkzeuge, welche orientiert sind an Häufigkeiten und Wahrscheinlichkeiten. Deterministisch sowie probabilistisch erhaltene Datensätze können methodisch nicht gleichsinnig behandelt werden. Geeignete probabilistische Maße und Werkzeuge werden im Folgenden vorgestellt.

#### Eigenschaften einer probabilistischen Vorhersage

WILKS (2011) nennt die folgenden Eigenschaften, welche für die Güte einer probabilistischen Vorhersage eine Rolle spielen (die folgende Darstellung orientiert sich an KLEIN ET AL., 2016):

**Genauigkeit (Accuracy):** Die mittlere Übereinstimmung zwischen vorhergesagten und beobachteten Werten bzw. Ereignissen (meist mit Blick auf bestimm-

te Schwellenwerte, z. B. Niederschlagshöhe in sechs Stunden); geeignetes Maß: Area Under Curve (AUC) oder Continuous Ranked Probability Score (CRPS); siehe Abschnitt 2.4.1 und ff.

**Verzerrung (Bias):** Systematischer Fehler (gerichtete Abweichung) der Vorhersage; geeignetes Maß: Multiplicative Bias (mBIAS); siehe Abschnitt 2.4.2.

**Vertrauenswürdigkeit (Reliability):** Gibt an, wie stark sich vorhergesagte und beobachtete Eintrittswahrscheinlichkeiten von Ereignissen (z. B. Niederschlagshöhe in sechs Stunden größer als bestimmter Schwellenwert) ähneln; geeignetes Werkzeug: Reliability Diagram.

**Schärfe (Sharpness):** Breite der prädiktiven Dichteverteilung; geeignetes Werkzeug: Continuous Ranked Probability Score (CRPS). Damit in Zusammenhang stehend:

**Dispersion (Spread):** Streuung der probabilistischen Vorhersagen (bzw. des Ensembles); geeignetes Werkzeug: Continuous Ranked Probability Score (CRPS).

Neben dem Begriff der Vertrauenswürdigkeit (Reliability) wird auch die Kohärenz (Coherence) verwendet, welche gegeben ist, wenn die betrachtete Vorhersage mindestens die gleiche Güte, wie eine ausschließlich auf Klimatologie/statistischer Erwartung beruhende Vorhersage hat. Die beiden letztgenannten Attribute (Sharpness und Spread) sind dabei unabhängig von der Beobachtung/Referenz. Für die genannten Attribute sollen im Folgenden geeignete und gleichsam typische Maße für deren Bewertung vorgestellt werden.

### FAR, POD, ROC-Curves und AUC im probabilistischen Fall

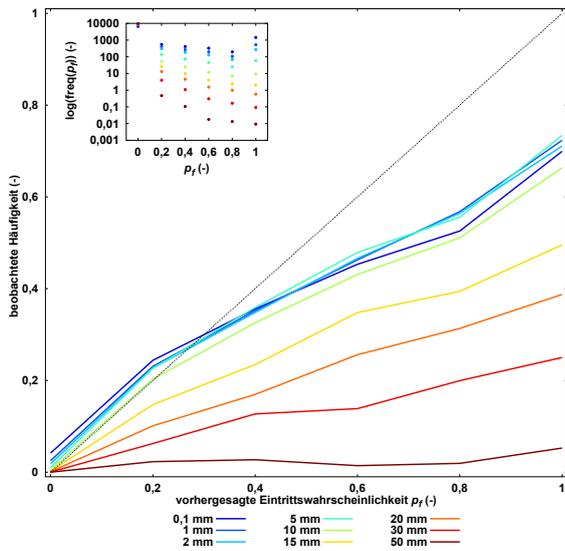
Zur Erstellung der ROC-Kurven ergeben sich für deterministische und probabilistische Vorhersagen unterschiedliche Berechnungsvorschriften. Im Falle einer deterministischen Vorhersage werden – wie in Abschnitt 2.4.1 gezeigt – verschiedene *Schwellenwerte* (z. B. 10 mm in 6 h) definiert um Ereignisse bzw. Nicht-Ereignisse zu unterscheiden. Für jeden der definierten Schwellenwerte wird zunächst die POD/FAR ermittelt und im Anschluss anhand der  $n$  POD-FAR-Tupel (mit  $n$ : Anzahl der Schwellenwerte) die ROC-Kurve aufgespannt.

Bei probabilistischen Daten hingegen wird zur Bildung der ROC-Kurve ein *Ereignis* (z. B. 10 mm in 6 h) definiert. Für jede Vorhersage wird nun zeitschrittweise die Überschreitungshäufigkeit der Ensemble-Member in Bezug auf das Ereignis ermittelt. In einem weiteren Schritt werden Klassen der Überschreitungswahrscheinlichkeit festgelegt (z. B.  $0,2 < p < 0,4$ ), auf deren Basis dann die Berechnung der POD/FAR erfolgt: Zunächst werden alle Vorhersagen ermittelt, bei denen die Überschreitungshäufigkeit der einzelnen Member innerhalb der Klassengrenzen der betrachteten Überschreitungswahrscheinlichkeit liegen. Für diese Vorhersagen wird ermittelt, ob das Ereignis – in diesem Falle ein 6-h-Niederschlag von 10 mm – beobachtet wurde oder nicht und entsprechend die POD/FAR berechnet. Die  $n$  POD-FAR-Tupel (mit  $n$ : Anzahl Klassen der Überschreitungswahrscheinlichkeit) stellen wiederum die Datenpunkte der ROC-Kurve dar. Folglich ergibt sich für die AUC aus deterministischen Vorhersagen ein anderer Informationsgehalt, als für die AUC aus probabilistischen Vorhersagen, weshalb diese Maße nicht direkt miteinander verglichen werden sollten.

### Reliability Diagram (Verlässlichkeitsdiagramm)

Das Reliability Diagram (siehe Abbildung 2.4.2) ist ein Werkzeug zur Beurteilung der Vertrauenswürdigkeit (oder Verlässlichkeit bzw. Zuverlässigkeit) einer probabilistischen Vorhersage, basierend auf der zusammenschauenden Darstellung von vorhergesagten und beobachteten (empirischen) Eintrittswahrscheinlichkeiten bestimmter Ereignisse (beim Niederschlag in der Regel Schwellenwerte oder Niederschlagssummen). Im Optimalfall liegt die Beziehung zwischen vorhergesagten und beobachteten Wahrscheinlichkeiten auf der Hauptdiagonale (maximale Zuverlässigkeit). Beispielsweise sollte für eine optimale Vorhersage ein Ereignis, für welches die Vorhersage eine Eintrittswahrscheinlichkeit von 50 % angibt auch in 50 % aller Fälle beobachtet werden können.

Für das Reliability Diagram werden zunächst (für ein bestimmtes Ereignis; hier: für eine bestimmte sechsstündige Niederschlagssumme) die probabilistischen Vorhersagen entsprechend der vorhergesagten Wahrscheinlichkeiten klassifiziert (abgetragen auf der Abszisse). Die Häufigkeit, mit der das jeweilige Ereignis für die betreffende Menge an Vorhersagen im Auftreten beobachtet werden konnte, wird dann auf der Ordinate abgetragen. Somit er-



**Abbildung 2.4.2:** Beispiel eines Reliability Diagrams; gezeigt ist die Bewertung des probabilistischen NWP-Produkts COSMO-DE-EPS für den Zeitraum 10.12.2010 bis 31.12.2015 für das Gebiet des Freistaats Sachsen, bezogen auf orthogonale Bilanzflächen mit einer Zellgröße von rund 10 km<sup>2</sup> und verschiedene Schwellenwerte des Niederschlags von 0,1 bis 30 mm in sechs Stunden; Vorhersageweite sind sechs Stunden. Der kleine Subplot illustriert die der empirischen Auswertung zugrunde liegenden Fallzahlen; bemerkenswert dabei sind die geringen Fallzahlen für höhere Schwellenwerte. Fallzahlen kleiner eins ergeben sich durch Mittelung über alle Bilanzflächen auf dem Gebiet Sachsens ( $n = 4.096$ ).

gibt sich für jedes Ereignis eine spezifische Kurve im Reliability Diagram.

In Abbildung 2.4.2 ist erkennbar, dass für Schwellenwerte bis einschließlich 10 mm in sechs Stunden der Verlauf der Wahrscheinlichkeitskurven konsistent ist; hier hat das Reliability Diagram Aussagekraft. Für höhere Schwellenwerte ist aufgrund der zu geringen Fallzahlen eine klare Zuverlässigkeitsaussage nicht mehr möglich. Generell ist für die Schar der Kurven für Schwellenwerte von 0,1 bis 10 mm zu erkennen, dass im Bereich von Wahrscheinlichkeiten von 0 bis ca. 0,4 die Modellvorhersage (Ensemble!) zuverlässig das aus der Beobachtung geschlossene Häufigkeitsregime abbildet; für Wahrscheinlichkeiten darüber überschätzt das probabilistische Modell die beobachteten Häufigkeiten etwas. Reliability Diagrams können die Grundlage für approximative Biaskorrekturen von Ensemblevorhersagen sein (z. B. EMOS).

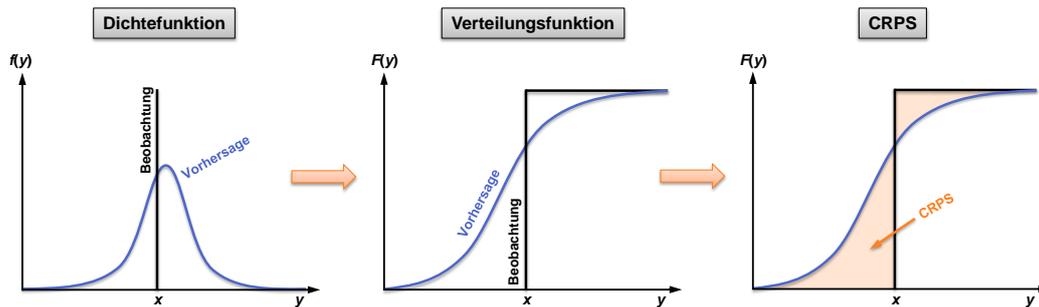
### Continuous Ranked Probability Score (CRPS)

Der Continuous Ranked Probability Score (CRPS) ist das gemeinhin meist genutzte Maß zur Bewertung probabilistischer Simulations- bzw. Vorhersageergebnisse. Er ist ein zusammenschauendes Maß für Genauigkeit (Accuracy) sowie Schärfe (Sharpness) und basiert auf einem integrativen Vergleich der Verteilung der Menge der Vorhersagen (in der Regel ein Ensemble, siehe dazu auch folgender Abschnitt) mit einer Referenz (meist einer Beobachtung). Der CRPS ist das Integral der quadrierten Differenz zwischen der kumulierten Verteilungsfunktion der probabilistischen Vorhersage  $F^V(y)$  sowie der Beobachtung  $F^B(y)$ , wobei letztere eine Stufenfunktion mit den möglichen Werten  $F^B(y) = [0; 1]$  ist (siehe Abbildung 2.4.3). Der CRPS berechnet sich folglich zu:

$$CRPS = \int (F^V(y) - F^B(y))^2 dy \quad (2.4.14)$$

Der CRPS weist seine optimale Güte bei einem Wert von 0 auf und hat die Einheit der zugrunde liegenden Daten (z. B. mm · h<sup>-1</sup>). Er misst die Genauigkeit (Accuracy), also die Lagebeziehung zwischen Dichtefunktion  $f(y)$  der probabilistischen Vorhersage und der Beobachtung – größere Abweichung bedeuten einen größeren CRPS. Eine höhere Schärfe (Sharpness) der probabilistischen Vorhersage („engere“ Dichtefunktion; siehe Abbildung 2.4.3) bedingt, dass die kumulierte Verteilung der Vorhersage sich stärker der Stufenfunktion der Beobachtung annähert; die Flächendifferenz und damit der CRPS werden geringer. Im Umkehrschluss bedeutet eine größere Dispersion der probabilistischen Dichtefunktion (Spread) ebenfalls einen schlechteren (höheren) CRPS. Für eine Einzelvorhersage ist der CRPS gleich dem MAE (siehe Abschnitt 2.4.2).

**Schlussfolgerung 12:** *Probabilistische Vorhersagen müssen hinsichtlich ihrer Güte mit anderen Methoden und Werkzeugen bewertet werden, als deterministische Vorhersagen. Verschiedene, für eine integrative, gesamtgesellschaftliche Gütebewertung wichtige Eigenschaften einer probabilistischen Vorhersage, lassen sich nur teilweise gleichzeitig betrachten.* ❖



**Abbildung 2.4.3:** Skizze zur Ableitung des CRPS. Der CRPS ist proportional des Inhalts der Differenzfläche (orange markiert in der Abbildung) zwischen der kumulierten Verteilungsfunktion der Vorhersage  $F(y)$  sowie der Verteilungsfunktion (Stufenfunktion!) der Beobachtung.

## 2.5 Zu Unsicherheiten und Ensemble-Techniken

Hydrologische Vorhersagen können – wie bereits ausgeführt – ein entscheidendes Element des Hochwasserrisikomanagements darstellen. Dabei spielt die Kenntnis von Zuverlässigkeit und Genauigkeit von Vorhersagen eine wichtige Rolle. Wenn Unsicherheiten betrachtet werden, dann ist nicht mehr nur ein deterministischer Wert einer bestimmten Größe entscheidend (z. B. Wasserstand in sechs Stunden), sondern auch die Wahrscheinlichkeit bestimmter Werte/Realisierungen der betrachteten Größe (probabilistischer Ansatz).

Generell geht man davon aus, dass die Berücksichtigung von Unsicherheiten bei der hydrologischen Vorhersage einen Mehrwert für den Endnutzer haben kann (AJAMI ET AL., 2007; DUAN ET AL., 2007; KLEIN ET AL., 2016; TODINI, 2017). So vollzieht sich seit einiger Zeit auch in der Praxis ein Paradigmenwechsel weg von deterministischen, hin zu probabilistischen Methoden bei der Erstellung von Abfluss- bzw. Hochwasservorhersagen bzw. bei der Kommunikation von Ergebnissen (wie es in der Meteorologie/Wettervorhersage bereits seit geraumer Zeit praktiziert wird). Beispiele für Deutschland sind hier die diesbezüglichen Aktivitäten der Bundesländer Rheinland-Pfalz, Baden-Württemberg und Bayern (JOHST ET AL., 2016; BREMICKER & VARGA, 2014; VOGELBACHER, 2014).

### 2.5.1 Quellen von Unsicherheiten

Es werden in der Literatur verschiedene Arten von Unsicherheiten unterschieden, wobei beispielsweise GRUND-

MANN (2010) und KLEIN ET AL. (2016) eine gute Übersicht dazu liefern und letztere hier zitiert sein sollen:

**Aleatorische Unsicherheit:** Dem System innewohnende Variabilität in Raum und Zeit, z. B. Unsicherheit numerischer Wettervorhersagen aufgrund des chaotisch-deterministischen Verhaltens der Erdatmosphäre, was die Vorhersagbarkeit des Wetters begrenzt.

**Epistemische Unsicherheit:** Unvollkommenes Wissen über das System und den Systemzustand; führt zu Inputparameterunsicherheit (Messunsicherheit), struktureller Modellunsicherheit, Modellparameterunsicherheit, Prozessparameterunsicherheit:

**Inputparameterunsicherheit:** Durch Messfehler von Zustands- und Antriebsvariablen (Bestimmung von Anfangs- und Randbedingungen), also beispielsweise Fehler in meteorologischen Beobachtungsdaten oder Fehler in der quantitativen Niederschlagsvorhersage bzw. -schätzung.

**Strukturunsicherheit:** Bei der Modellierung wird eine vereinfachende Abbildung des Natursystems vorgenommen (Abstraktion). Dabei bleiben wichtige Prozesse völlig unberücksichtigt oder ihr Wirkmechanismus wird nur unzureichend durch mathematische Gleichungen beschrieben.

**Modellparameterunsicherheit:** Modellparameter sind Parameter wie z. B. räumliche und zeitliche Diskretisierung; dem mathematischen Modell zugrunde liegende Gleichungen werden oftmals numerisch behandelt. Dabei entstehen – abhängig von den gewählten

Modellparametern – Fehler, welche sich in der Modellparameterunsicherheit niederschlagen.

**Prozessparameterunsicherheit:**

Prozessparameter nehmen Einfluss auf die Beschreibung natürlicher Vorgänge anhand konzeptioneller Ersatzvorstellungen (beispielsweise ein Einzellinearspeicher als Repräsentant für den Grundwasserspeicher). Prozessparameter sind oftmals *effektive Parameter*, lassen sich also nicht direkt in der Natur messen und müssen kalibriert werden. Diese Kalibrierung (meist im Sinne einer Optimierung ausgetragen) kann nur anhand der raum-zeitlich integrierten Systemantwort (nämlich anhand von Abflussmessungen) erfolgen. Damit ist die Optimierungsaufgabe mehrfach überbestimmt und mehrere Parametersätze führen zu vergleichbaren Modellergebnissen. Dieses Phänomen wurde durch BEVEN & BINLEY (1992) in die hydrologischen Wissenschaften eingeführt und wird seit dem als *Äquifinalität* bezeichnet.

Bei der Erstellung hydrologischer Vorhersagen ist es das Ziel, die genannten Unsicherheiten zu reduzieren, beispielsweise durch Methoden der Datenassimilation, Zustandsnachführung und Fehlerkorrektur (siehe dazu Abschnitt 2.3). Dennoch kann die Vorhersagegüte nicht beliebig gesteigert werden; es verbleibt eine Restunsicherheit, die es mit geeigneten Methoden zu quantifizieren gilt, üblicherweise mit Ensemble-Techniken (siehe folgender Abschnitt). Streng genommen ist aber aus Sicht des Hochwasserrisikomanagements nicht die Kenntnis der Unsicherheit (im Sinne einer Spannweite) entscheidend, sondern eine Information über die Eintrittswahrscheinlichkeit (in Form einer Wahrscheinlichkeitsverteilung) eines vorhergesagten Wertes.<sup>1</sup>

Die modellbasierte Vorhersage ist dabei nur ein Hilfsmittel, um diese eigentlich unbekanntere Wahrscheinlichkeitsverteilung zu schätzen. Entscheidend ist, dass es sich bei der Wahrscheinlichkeitsverteilung um eine *bedingte Verteilung* handelt, welche unter anderem von den oben besprochenen Fehlerquellen und vorhandenen statistischen Abhängigkeiten zwischen einzelnen Fehlern konditioniert ist (die wiederum einer bestimmten Wahrscheinlichkeitsverteilung folgen). KLEIN ET AL. (2016) bemerken, dass damit

die bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung des vorhergesagten Wertes dem „zum Vorhersagezeitpunkt verfügbaren Wissen über die Zukunft“ genügt. Die angesprochene bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung wird in ihrer Wirkung auch als *prädiktive Unsicherheit* (oder Prognoseunsicherheit) bezeichnet (TODINI, 2004).

Für die Bestimmung der prädiktiven Unsicherheit gibt es eine Vielzahl von Methoden, wobei die meisten zu den statistischen Post-Prozessierungs-Methoden (SPPMs) gehören. Eine gute Übersicht dazu findet sich auf der Webseite<sup>2</sup> des Hydrologic Ensemble Prediction Experiments (HEPEX), einer internationalen Initiative zur Stärkung von Ensemblevorhersagen in der operationellen Hydrologie. Das Ziel ist stets die probabilistische Bewertung von Ensemblevorhersagen<sup>3</sup> unter Berücksichtigung von Unsicherheiten aus den genannten Quellen. Ganz generell wird mit SPPMs versucht, die Häufigkeitsverteilung von Vorhersagen bzw. deren Fehlern in der Vergangenheit zu charakterisieren und diese Information dann zu benutzen, um die aktuelle prädiktive Unsicherheit zu bestimmen. Dazu wird das hydrologische Modell für die Vergangenheit (Simulation) betrieben, oftmals mit *beobachteten* Antriebsdaten. Im Vorhersagefall wird es dann mit *vorhergesagten* Daten angetrieben. Hier wird – und das ist ein sehr wichtiger Punkt, da er praktisch nicht erfüllt sein kann – davon ausgegangen, dass sich das hydrologische Modell für sich hinsichtlich ihrer Fehlerstruktur unterscheidende Antriebe ähnlich verhält und somit eine prognostische Aussage erst zulässig ist.

Die Anwendung statistischer Methoden zur Post-Prozessierung ist aufwändig. Zum einen muss *per se* im Sinne der Ensembleverarbeitung die Modellkette entsprechend der Anzahl von Ensemblemitgliedern oft betrieben werden. Des Weiteren sind die einzelnen Unsicherheitsquellen bzw. die Verteilungen der unsicheren Parameter teilweise im statistischen Sinne abhängig; die prädiktive Unsicherheit ist durch eine bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung charakterisiert. Um diese Abhängigkeiten entsprechend zu modellieren, werden häufig Methoden der Bayes'schen Inferenz<sup>4</sup> angewendet. Dabei handelt es sich

<sup>2</sup>HEPEX-Webseite: <http://hepex.irstea.fr/hepex-sip-topic-post-processing-23> (abgerufen am 13.09.2016).

<sup>3</sup>Ensembles können auf unterschiedliche Art und Weise gewonnen werden; siehe dazu Abschnitt 2.5.2.

<sup>4</sup>Basiert auf dem Satz von (Thomas) Bayes (\*1701; †1761), welcher die Berechnung bedingter Wahrscheinlichkeiten beschreibt.

<sup>1</sup>Das Risiko lässt sich überhaupt erst durch das Vorhandensein von Wahrscheinlichkeitsaussagen quantifizieren (siehe Abschnitt 1.2).

oft um Ansätze, welche auf Sampling- und Monte-Carlo-Verfahren abstellen.<sup>1</sup> Auf eine weitgehendere Darstellung des Themas wird an dieser Stelle verzichtet und stattdessen auf die einschlägige Literatur verwiesen.

## 2.5.2 Ensemble-Techniken zur Quantifizierung der prädiktiven Unsicherheit

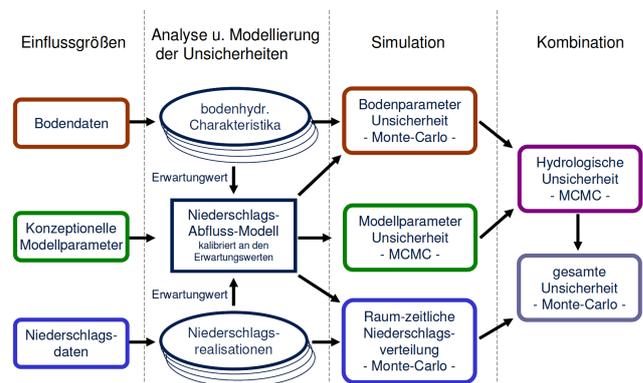
Wie bereits angesprochen, werden zur Quantifizierung der prädiktiven Unsicherheit (siehe vorangegangener Abschnitt) in der Regel Ensemble-Techniken verwendet. Dabei werden die einzelnen Unsicherheitsquellen auf unterschiedliche Weise berücksichtigt (siehe Tabelle 2.5.1). Die Inputparameterunsicherheit (bezogen auf die meteorologischen Eingangsgrößen) wird durch meteorologische Ensemblevorhersagen abgebildet. Dabei werden die Anfangsbedingungen der Wettermodelle durch Perturbation<sup>2</sup> und/oder Ensemble-Datenassimilations-Techniken variiert sowie unterschiedliche Randbedingungsdaten verwendet (meist Antriebe aus unterschiedlichen Globalmodellen). Beispielsweise wird das COSMO-DE-EPS-Ensemble (20 Member plus ein Kontrolllauf) durch Antrieb an seinen Rändern mit den Vorhersagen aus vier Globalmodellen sowie durch Berücksichtigung von fünf verschiedenen Anfangszuständen durch Perturbation sowie Variationen in der Modellphysik erzeugt.

Die Modellstrukturunsicherheit kann mit Multi-Model-Verfahren einbezogen werden; das meint schlichtweg die Verwendung mehrerer, unterschiedlicher hydrologischer Modelle für Simulation/Vorhersage. Recht neu hingegen – und daher eher im Forschungsbereich bekannt – sind hydrologische Modelle mit flexibler Modellstruktur zur Aufklärung und Ermittlung der Modellstrukturunsicherheit; zuvorderst ist hier sicherlich der SUPERFLEX-Ansatz (FENICIA ET AL., 2011) zu nennen.

Für die Modell- und Parameterunsicherheiten bedient man sich oftmals Sampling-Techniken wie des MCMC-Verfahrens (Markov-Chain-Monte-Carlo-Verfahren). Hier

<sup>1</sup>Hier geht es darum, eine stetige (beispielsweise durch eine Verteilungsfunktion beschriebene) Größe (wie beispielsweise einen unsicheren, in bestimmten Grenzen schwankenden Prozessparameter) empirisch hinreichend zu beschreiben (durch häufiges Sampling) und dann diese Vielzahl an Parameter-Varianten durch die Modellkette zu propagieren und die Ergebnisse entsprechend ihrer empirischen Häufigkeit auszuwerten.

<sup>2</sup>Perturbation ist das algorithmische Einbringen von Störungen in eine Feldgröße.



**Abbildung 2.5.1:** Beispielhafte, auf Monte-Carlo-Methoden basierende, integrierte Bestimmung der prädiktiven Unsicherheit in der flächendifferenzierten hydrologischen Modellierung nach GRUNDMANN (2010). Betrachtet werden hier Inputparameterunsicherheit („Niederschlagsdaten“) anhand stochastisch simulierter Niederschlagsfelder sowie Prozessparameterunsicherheiten („Bodendaten“ sowie „konzeptionelle Prozessparameter“). Strukturelle Unsicherheiten und Modellparameterunsicherheiten bleiben zunächst unberücksichtigt. Abbildung entnommen aus GRUNDMANN (2010).

ist es das Ziel, eine bekannte (oder vermutete!) Verteilung der Modell- oder Prozessparameter mit einer möglichst kleinen Stichprobe im statistischen Sinne hinreichend genau zu beschreiben, um die Anzahl erforderlicher Modellsimulationen gering zu halten (siehe zu diesen Verfahren auch GRUNDMANN, 2010).

Schließlich müssen alle Unsicherheiten zusammengebracht werden indem sie konsequent durch das hydrologische Modell propagiert werden (in der Regel mit Monte-Carlo-Techniken) und hernach mit Blick auf potentiell vorhandene statistische Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Unsicherheitsquellen ausgewertet werden. Wenn die Unsicherheitsbetrachtung konsequent erfolgt, ist das Vorgehen sehr aufwändig und erfordert – auch heute noch – meist die Verwendung von Großrechnern (aufgrund des exzessiven Einsatzes von Monte-Carlo-Techniken; siehe dazu auch Abbildung 2.5.1).

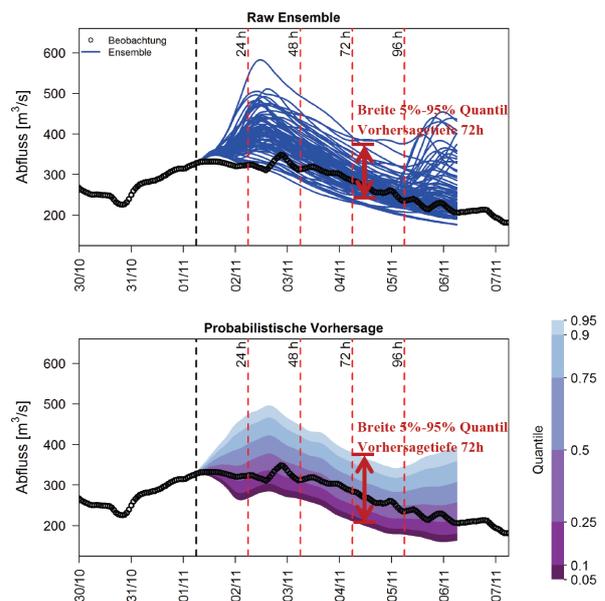
KLEIN ET AL. (2016) bemerken – zu Recht – dass „in der operationellen Vorhersage-Praxis fälschlicherweise oft die rohen, also die nicht statistisch post-prozessierten Ensemblevorhersagen (...) als probabilistische Vorhersagen interpretiert werden, obwohl sie lediglich eine endliche Menge deterministischer Einzelvorhersagen darstellen.“ Diese direkte Verwendung von Ensemble-Ergebnissen zur Bestimmung der prädiktiven Unsicherheit (beispielsweise durch eine einfache Perzentilauswertung der Ergebnisse)

**Tabelle 2.5.1:** Übersicht von Verfahren der Unsicherheitsschätzung für hydrologische Simulationen und Vorhersagen.

Unsicherheitsquelle	Berücksichtigung durch	Beispielmethode
Inputparameter	Verwendung von probabilistischen Wettervorhersagen (Ensembles)	Perturbation der Anfangsbedingung, Verwendung unterschiedlicher Randbedingungen (Globalmodelle)
Modellstruktur	Simulation/Vorhersage mit unterschiedlichen hydrologischen Modellen	Multi-Model-Verfahren
Modellparameter	Simulation/Vorhersage mit unterschiedlichen Modellparametersätzen	MCMC-Verfahren (Markov-Chain-Monte-Carlo-Verfahren)
Prozessparameter	Simulation/Vorhersage mit unterschiedlichen Prozessparametersätzen	MCMC-Verfahren
Prädiktive Unsicherheit	Monte-Carlo-Methoden, statistische Post-Prozessierungs-Methoden	MCMC-Verfahren; anschließend Bayes'sches Model Averaging (BMA), Ensemble Model Output Statistics (EMOS) etc.

ist aufgrund der Korrelations- und Fehlerstruktur (bedingte Wahrscheinlichkeiten! statistische Abhängigkeit!) fachlich klar falsch (TODINI, 2016; HERNÁNDEZ-LÓPEZ & FRANCÉS, 2017; BOGNER ET AL., 2017); im Umkehrschluss bedeutet das Gesagte, dass eine methodisch saubere Quantifizierung der prädiktiven Unsicherheit rechentechnisch eher aufwändig ist, was den Erfordernissen des operationellen Vorhersagegeschäfts zumindest in Teilen entgegensteht. Abschließend zeigt Abbildung 2.5.2 den angesprochenen Unterschied zwischen einem rohen Ensemble (Raw Ensemble) und dem post-prozessierten Ensemble (prädiktive Unsicherheit).

**Schlussfolgerung 13:** *Trotz der Methoden zur Fehlerreduktion (wie Datenassimilation, Zustandsnachführung und Fehlerkorrektur) verbleibt bei der hydrologischen Simulation und Vorhersage eine Restunsicherheit in Form der prädiktiven Unsicherheit. Die Quantifizierung der prädiktiven Unsicherheit liefert eine Wahrscheinlichkeitsaussage für vorhergesagte Werte und ist per se methodisch und rechentechnisch eher aufwändig. Meist basiert sie auf Ensemble-Techniken. Ganz grundsätzlich und vorab einer operationellen Bestimmung der prädiktiven Unsicherheit, muss die Frage geklärt werden, wie und mit welchen Konsequenzen für das Risikomanagement solche Wahrscheinlichkeitsaussagen kommuniziert werden.* ❖



**Abbildung 2.5.2:** Vergleich eines nicht probabilistisch prozessierten rohen Ensembles (oben) mit einem post-prozessierten Ensemble (unten) als „echte“ probabilistische Vorhersage. Bemerkenswert ist die bessere Abdeckung der probabilistischen Vorhersage (Beobachtung liegt immer „innerhalb“ des Ensembles) sowie ihre oftmals bessere Schärfe, verglichen mit dem Raw Ensemble, beispielsweise für eine Vorhersageweite von 24 h zu erkennen. Abbildung entnommen aus KLEIN ET AL. (2016).

## 2.6 Zur Vorhersage in unbeobachteten Einzugsgebieten

Die Hochwasserfrühwarnung für kleine Einzugsgebiete ist ein gar klassisches Kernfeld für die Motivation, Entwicklung und Erprobung von Methoden zur Vorhersage in unbeobachteten Einzugsgebieten (PUB – Prediction in Ungauged Basins). Aufgrund des naturgemäßen Fehlens von hydrologischen Beobachtungsdaten („Pegeldaten“) für einen Großteil dieser kleinen Gebiete, kann nur sehr indirekt auf ihre hydrologische Reaktion auf Niederschlag geschlossen werden. Das wiederum macht das Erstellen von klassischen, deterministischen N-A-Modellen<sup>1</sup> sehr schwierig, weil eine Kalibrierung effektiver Parameter<sup>2</sup> sowie eine direkte Validierung anhand von Abflussbeobachtungen *per se* ausgeschlossen sind.

Die in Abschnitt 2.2 vorgestellten Modellansätze (deterministisch, datengetrieben, Bewertungsverfahren der Hochwasseranfälligkeit) eignen sich unterschiedlich gut zur Vorhersage bzw. zur Ableitung einer Hochwasserfrühwarnung für unbeobachtete Einzugsgebiete. Tabelle 2.6.1 bietet einen Vergleich der Modellansätze mit Blick auf ihre potentielle Einsetzbarkeit für die Hochwasserfrühwarnung für unbeobachtete Gebiete.

Deterministische Ansätze können auf unbeobachtete Gebiete übertragen werden, indem Parameter des Modells (in der Regel Prozessparameter, also effektive Parameter) – beispielsweise Speicherkonstanten, hydraulische Leitfähigkeit, hydraulische Rauigkeiten – für beobachtete Gebiete kalibriert und dann zu geeigneten Gebietseigenschaften („Proxies“ wie z. B. Einzugsgebietsgröße, Landnutzung, Bodenart) mittels eines empirischen Modells (beispielsweise via Mehrfachregression) in Beziehung gebracht werden. Hauptprobleme und damit Hauptquelle von Unsicherheiten sind hier zum einen die eventuell vorhandenen Abhängigkeiten der Parameter (Phänomen der Äquifinalität – siehe Abschnitt 2.5.1) sowie deren eingeschränkte, konzeptionelle Gültigkeit über verschiedene räumliche Skalenbereiche hinweg. Darüber hinaus ist der Datenaufwand mit Blick auf die üblicherweise hohe Zahl an effektiven Parametern in einem deterministischen Modell einerseits und bezüglich der

in Frage kommenden Vielzahl an Proxies andererseits, als hoch einzuschätzen. Bei guter Datenlage und sauberem methodischem Vorgehen ist hier aber die zu erwartende Genauigkeit von Modellaussagen für unbeobachtete Gebiete – verglichen mit den weiteren Ansätzen – als am höchsten einzuschätzen.

Bei datengetriebenen Ansätzen muss unterschieden werden zwischen „klassischen“ datengetriebenen (empirischen) Verfahren und Soft-Computing-Verfahren (z. B. KNN). Letztere weisen eine stark eingeschränkte räumliche Übertragbarkeit auf, da ihre Modellstruktur direkt abhängig von der zugrunde liegenden Input-Output-Datenbasis ist (also den N-A-Daten), welche für unbeobachtete Einzugsgebiete *per se* nicht existiert. Empirische N-A-Verfahren, wie z. B. das SCS-Verfahren (USDA, 1986) zur Beschreibung der Abflussbildung,<sup>3</sup> basieren – analog zum für deterministische Modelle beschriebenen Vorgehen – auf einer empirisch abgeleiteten Beziehung von Parametern zu bestimmten Proxy-Größen (konkret für das SCS-Verfahren: „Curve Number“ abhängig von der „Soil Group“). Der Unterschied ist hier lediglich, dass das zugrunde liegende Modell nicht-mechanistisch (also nicht-deterministisch), sondern rein empirischer Natur ist. Die zu erwartende Genauigkeit ist als mittelmäßig einzuschätzen; der methodische Aufwand in der Anwendung ist gering. Für eine grundsätzliche Neukonzeption und Erstellung eines empirischen Verfahrens wie dem SCS-Verfahren ist der Datenbedarf und der damit verbundene Aufwand hingegen hoch. Generell gilt – wie für alle empirischen Modelle – dass ihre Gültigkeit außerhalb der zu ihrer Konzeption und Parametrisierung herangezogenen Datendomäne immer eingeschränkt ist.

Bewertungsverfahren der Hochwasseranfälligkeit hingegen sind für ihren Betrieb nicht auf Abflussbeobachtungen angewiesen (siehe Abbildung 2.2.2). Wie bereits in Abschnitt 2.2 erörtert, ist ihr Datenbedarf vergleichsweise gering, was sie zunächst sehr gut anwendbar für unbeobachtete Gebiete macht. Die zu erzielenden Modellprognosen sind allerdings auch vergleichsweise generell.

Allen angesprochenen Ansätzen gemein ist es – mit Blick auf ihre Anwendung für unbeobachtete Gebiete – dass sie ohne Abflussdaten nicht hinsichtlich ihres prädiktiven Nutzens bewertet werden können; hierfür sind zwingend Abflussbeobachtungen notwendig. Die Bewertung der räumlichen Übertragbarkeit eines bestimmten Ansatz-

<sup>1</sup>Für eine Frühwarnung braucht es nicht zwingend ein N-A-Modell; siehe Abschnitt 2.2.

<sup>2</sup>Deterministische hydrologische Modelle enthalten de facto immer Kalibrierparameter.

<sup>3</sup>Genauer bestimmt das Verfahren den Gebietsrückhalt (Verluste nach Abflussbeginn) und damit indirekt den Effektivniederschlag.

**Tabelle 2.6.1:** Vergleich der in Abschnitt 2.2 vorgestellten Modellansätze mit Blick auf ihre potentielle Einsetzbarkeit für die Hochwasserfrühwarnung für unbeeobachtete Gebiete.

Modellansatz	Übertragbarkeit für unbeeobachtete Gebiete	Typische Methodik bei der räumlichen Übertragung	Aufwand (methodisch und Datenbedarf)	Probleme	Zu erwartende Genauigkeit
Deterministische Ansätze	Gegeben	Regionalisierung von Parametern durch empirische Beziehungen	Datenbedarf: hoch; methodischer Aufwand: mittel (Regionalisierung)	Skaleneffekte, statistische Abhängigkeit von Parametern, Äquifinalität	Höher
Datengetriebene Ansätze (Soft-Computing-Verfahren sowie empirische Ansätze)	Nicht unmittelbar gegeben bei Soft-Computing-Verfahren; <sup>§</sup> prinzipiell gegeben bei empirischen Ansätzen (z. B. SCS-Verfahren)	Soft-Computing-Verfahren: entfällt i. e. S.; <sup>§</sup> empirische Ansätze: Regionalisierung von Parametern durch empirische Beziehungen (meist statistische Verfahren wie Regression)	Soft-Computing-Verfahren: entfällt i. e. S.; <sup>§</sup> empirische Ansätze: Datenbedarf hoch; methodischer Aufwand gering bis mittel (meist statistische Verfahren wie Regression)	Kaum räumliche Extrapolationsfähigkeit i. e. S. bei Soft-Computing-Verfahren; <sup>§</sup> eingeschränkte räumliche Gültigkeit außerhalb des mit Daten abgedeckten Bereichs	Soft-Computing-Verfahren: entfällt i. e. S.; <sup>§</sup> empirische Ansätze: mittel
Bewertungsverfahren der Hochwasseranfälligkeit (FSAPs)	Gegeben	Keine Verwendung von Abflussbeobachtungen; meist Einbeziehung morphologischer Gebietsigenschaften	Datenbedarf: gering; methodischer Aufwand: gering	Generalität der Verfahren	Geringer

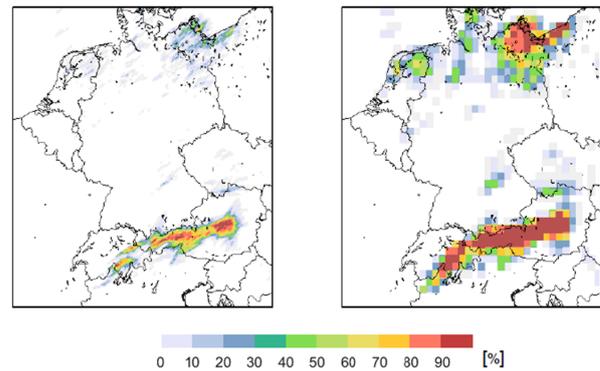
<sup>§</sup>Durch Nutzung von Proxy-Methoden ist eine räumliche Übertragung indirekt möglich (siehe als Beispiel Methodik in Abschnitt 8.3.1).

zes ist nur möglich, indem eigentlich beobachtete Gebiete als unbeobachtet angesehen werden und nach Modellübertragung und -anwendung dann die vorhandenen Beobachtungsdaten als Referenz zur Bewertung genutzt werden. Dabei sollten statistische Resampling-Methoden zum Einsatz kommen um zu überprüfen, ob ein Modellansatz stabil in Raum und Zeit übertragbar ist. Weiterhin ist auf diesem Wege die Abschätzung von aus der Regionalisierung erwachsender Unsicherheiten möglich. Einen guten Abriss und Einstieg für dafür notwendige Methoden liefern POMEROY ET AL. (2013).

**Schlussfolgerung 14:** Die Vorhersage bzw. Prognose für unbeobachtete Gebiete (also den Großteil kleiner Einzugsgebiete) stellt größte Herausforderungen an die hydrologischen Wissenschaften. Das Fehlen von Abflussbeobachtungen führt stets zu Einschränkungen des prädiktiven Nutzens von Modellergebnissen. Gleichsam muss für die Vorhersage und Prognose für unbeobachtete Gebiete erhöhter Aufwand hinsichtlich Daten und Methoden getrieben werden. Aufwand und Nutzen eines avisierten Verfahrens sind daher sehr sorgfältig abzuwägen, insbesondere mit Blick auf operationelle Anforderungen. ❖

## 2.7 Ableitung von Warnprodukten auf Basis hydro-meteorologischer Vorhersagen

In Abschnitt 1.3 wurde deutlich, dass Hochwasserfrühwarnungen oft meteorologische und hydrologische Vorhersagen zur Grundlage haben. Eine Frühwarnung muss effektiv, verlässlich und adressatengerecht sein. Streng genommen sollten also nur die tatsächlich von einem Ereignis Betroffenen als Adressaten bewarnt werden. Diese Betroffenheit kann sehr lokalen Bezug haben (z. B. bei einem Hausbesitzer) oder aber, es können eher administrativ-flächige Betroffenheiten vorhanden sein (beispielsweise Koordination des Katastrophenschutzes auf Landkreisebene). Weiterhin sind Vorhersagen unsicher (siehe Abschnitt 2.5) – ein punktgenauer Lagebezug einer Warnung könnte eine Genauigkeit vortäuschen, welche nicht gegeben ist. Es ist also durchaus sinnvoll, eine punktuell gültige Bewertung, wie sie im Regelfall aus einer hydro-meteorologischen Vorhersage



**Abbildung 2.7.1:** Wahrscheinlichkeitskarten, basierend auf dem post-prozessierten COSMO-DE-EPS-Ensemble („Schwellenwertkarten“). Dargestellt sind die Eintrittswahrscheinlichkeiten für das Ereignis „Niederschlagssumme in sechs Stunden größer/gleich 10 mm“. Die linke Abbildung zeigt das Produkt, erstellt auf Basis der eigentlichen horizontalen Modellauflösung von rund 2,8 km; die rechte Abbildung basiert auf dem im Text beschriebene Upscaling-Verfahren (horizontale Auflösung rund 28 mal 28 km). Abbildung entnommen aus RAUTHE ET AL. (2015).

hervorgeht, zu einer Flächeninformation zu aggregieren. Der DWD beispielsweise aggregiert die horizontal mit circa 2,8 km aufgelösten Vorhersagen aus COSMO-DE-EPS zu Wahrscheinlichkeitskarten mit einer Auflösung von 28 km, welche nachweislich besser als die 2,8-km-Produkte verifizieren (BUCHHOLD ET AL., 2014). Bei diesem Upscaling wird einer 28-km-Box der Maximalwert aller darin befindlicher Ursprungsinformationen zugewiesen (siehe Abbildung 2.7.1).

Bei den amtlichen operationellen Hochwasserfrühwarnsystemen in Deutschland werden die Warnungen für Landkreise erzeugt (siehe Abschnitt 1.6). Auch der Deutsche Wetterdienst hat seine Warnprodukte bis Juli 2016 für Landkreise generiert; mittlerweile jedoch für Gemeindegebiete. Werden Punktinformationen<sup>1</sup> – welche durchaus nicht gleichsinnig/gleichlautend sein müssen – zu einer Flächeninformation aggregiert, so braucht es dafür ein Regelwerk. Im einfachsten Falle könnte man sich der deskriptiven Statistik bedienen und beispielsweise alle Punkt- oder Teilgebietsvorhersagen im zu bewarnenden Gebiet hinsichtlich ihres Status auswerten und als aggregierte Warnung ein statistisches Moment wie Maximum, Mittelwert, Median oder Modalwert bemühen (wie z. B. beim oben beschriebenen Upscaling von Schwellenwerten des Niederschlags).

<sup>1</sup>Die Punktinformationen können hierbei sowohl deterministischer, als auch probabilistischer Natur sein.

**Tabelle 2.7.1:** Regelwerk der in Rheinland-Pfalz verwendeten WARNSIM-Methodik zur flächenhaften Aggregation teilgebietsbasierter Vorhersageinformationen zu einer Hochwasserfrühwarnung mit Bezug zu Flussgebieten (vormals Landkreise). Die Regeln werden gewissermaßen von „unten nach oben“ ausgewertet.

Regel	HQ-Häufigkeiten in Teilgebieten bzw. betroffene Anteile eines Vorhersagegebiets	Zugeordnete Warnstufe
1	–	< HQ(2)
2	3% > HQ(50)	≥ HQ(2)
3	10% > HQ(10) und 30% > HQ(2)	≥ HQ(2)
4	10% > HQ(5) und 40% > HQ(2)	≥ HQ(2)
5	25% > HQ(5) und 50% > HQ(2)	≥ HQ(2)
6	60% > HQ(2)	≥ HQ(2)
7	15% > HQ(50)	≥ HQ(10)
8	50% > HQ(10) und 75% > HQ(5)	≥ HQ(10)
9	25% > HQ(20) und 100% > HQ(5)	≥ HQ(10)
10	75% > HQ(10)	≥ HQ(10)
11	50% > HQ(20) und 75% > HQ(15)	≥ HQ(20)
12	25% > HQ(50) und 100% > HQ(15)	≥ HQ(20)
13	75% > HQ(20)	≥ HQ(20)
14	50% > HQ(50) und 75% > HQ(35)	≥ HQ(50)
15	25% > HQ(100) und 100% > HQ(35)	≥ HQ(50)
16	75% > HQ(50)	≥ HQ(50)

Auch möglich ist es, bei einer räumlichen Aggregation von Vorhersagen die Häufigkeitsverteilung vorhergesagter Werte oder Zustände einzubeziehen. In Rheinland-Pfalz beispielsweise wird dazu eine teilgebietsbasierte Häufigkeitsanalyse und Bewertung vorhergesagter Abflussjährlichkeiten<sup>1</sup> vorgenommen; die Methodik wird als WARNSIM bezeichnet (DEMUTH, 2015) und soll hier exemplarisch vorgestellt werden. Der Vorteil dabei ist, dass durch die häufigkeitsbasierte Ableitung einer flächenhaft gültigen Warninformation auch probabilistische Vorhersagen gleichsinnig behandelt werden können. Konkret wird bei WARNSIM die Menge der Vorhersagen (bestimmter Abflussbereiche) für das zu bewarnende Gebiet (also einen Landkreis oder Flussgebiet) in Häufigkeiten (Perzentile) zerlegt und mit einem Regelwerk eine der eins plus vier Warnstufen<sup>2</sup> (grün plus gelb, orange, rot, violett) zugeordnet. Das Regelwerk dafür ist in Tabelle 2.7.1 dargestellt.

Ein sehr grundsätzliches Problem, welches ganz generell bei der Ableitung von Warninformation auf Basis hydrologischer Vorhersagen/Simulationen besteht, ist, dass Abflüsse bzw. Abflussspenden gleicher Jährlichkeit völlig unterschiedliche Auswirkungen im Einzugsgebiet haben können. Manche – auch kleinere – Gewässer können durchaus ein HQ(20) oder gar ein HQ(50) schadfrei abführen, andernorts können bereits bei HQ(2) einzelne bebaute Grundstücke betroffen sein. Dieses Dilemma lässt sich mittels einer generellen, flächig gültigen Bewarnung nur unzureichend adressieren. Darüber hinaus bedürfte es für eine detaillierte Betrachtung einer Unmenge lokal-hydraulischer Informationen, welche nicht mit vertretbarem Aufwand zu erheben und zu verarbeiten wären.

<sup>1</sup>Die Jährlichkeiten von modellierten/vorhergesagten Abflüssen aus unbeobachteten Teilgebieten werden anhand regionalisierter Hochwasserkennwerte ermittelt. Die Regionalisierung wird mittels der Methodik HQ-REGIO durchgeführt, welche auch für Sachsen flächendeckend angewendet wurde (siehe dazu beispielsweise LFULG, 2012).

<sup>2</sup>Die Stufen bedeuten: geringe Hochwassergefährdung (grün; < HQ(2)), mäßige Hochwassergefährdung (gelb; ≥ HQ(2)), mittlere Hochwassergefährdung (orange; ≥ HQ(10)), hohe Hochwassergefährdung (rot; ≥ HQ(20)), sehr hohe Hochwassergefährdung (violett; ≥ HQ(50)).

Aus den vorgenannten Gründen sollte die Erstellung von Produkten zur Hochwasserfrühwarnung nicht vollständig automatisiert werden; vielmehr sollte für den Vorhersagehydrologen stets die Möglichkeit bestehen, Warnstufen/zustände manuell zu ändern sowie spezifische Zusatzinformationen (z. B. in Textform) dem Produkt ergänzend beizugeben um die „hydrologischen Warnungen“ in ein Maß für die lokale Hochwassergefährdung zu übersetzen.

**Schlussfolgerung 15:** *Einem Produkt zur Hochwasserfrühwarnung zugrunde liegende Bewertungen (auf Basis von Beobachtungen/Vorhersagen von Niederschlag/Abfluss) haben meist punktuellen oder lokalen Bezug. Für das Hochwasserrisikomanagement sind aber generellere Warntausagen mit flächigem, regionalen Bezug wichtig. Für diese räumliche Aggregation muss ein geeignetes Verfahren konzipiert und operationell betrieben werden.* ❖

## 3 Der Weg hin zu einem operationellen Hochwasserfrühwarnsystem für Sachsen

Derzeit ist für Sachsen der Hochwassernachrichten- und Alarmdienst für den Fall von Ausuferungen an jenen Gewässern implementiert, an denen die HWMO (HWMO, 2015) gilt, also in der Regel unterstrom der kleinsten, durch als Hochwassermeldepegel definierte Messstellen überwachten Kopfgebiete. Damit ist ein Gutteil der Landesfläche aktuell nicht durch spezifische Hochwassernachrichten- bzw. Warnprodukte versorgt. Dieses Kapitel illustriert den Weg hin zu einem operationellen Hochwasserfrühwarnsystem für kleine, potentiell schnell reagierende Einzugsgebiete in Sachsen.

### 3.1 Abriss historischer sowie rezenter kleinräumiger Hochwasserereignisse

Sachsen war immer wieder von teilweise verheerenden kleinräumigen Hochwasserereignissen betroffen. Die Ursachen hierfür sind vielfältig und liegen auch in der orographischen Gliederung und Morphologie von Teilen des Gebiets des heutigen Freistaats begründet. Tabelle 3.1.1 gibt eine Übersicht über die in der Literatur prominentesten Ereignisse des 20. und beginnenden 21. Jahrhunderts.<sup>1</sup> SMUL (2002) enthält eine Übersicht lokaler sommerlicher Starkniederschlagsereignisse mit katastrophalen Auswirkungen im 20. Jahrhundert, welche in Abbildung 3.1.1 dargestellt ist und in der sich viele der in Tabelle 3.1.1 aufgeführten Ereignisse wiederfinden.

Betrachtet man die ausgewählten Ereignisse, so fallen drei Gemeinsamkeiten auf. Erstens bewegen sich die lokalen Spitzenintensitäten in einem extremen Jährlichkeitsbereich. Legt man eine typische Starkregenauswertung wie KOSTRA (BARTELS ET AL., 2005) zugrunde und schätzt

ausgehend von den flächig gültigen KOSTRA-Werten<sup>2</sup> die lokalen Intensitätsmaxima für bestimmte Jährlichkeiten und Andauern, so würden sich, vor allem für die Ereignisse kurzer Andauern, Jährlichkeiten weit jenseits von 100 ergeben. Zweitens lässt sich ein gehäuftes Auftreten lokaler Starkniederschlagsereignisse im Zeitraum Ende Juni bis Mitte August beobachten. Drittens gibt es eine regionale Häufung von Schadereignissen durch Abfluss in Folge von Starkregen im gegliederten Gelände von Vogtland, Erzgebirge, Mulde-Lösshügelland/Erzgebirgsvorland sowie Lausitzer Hügel- und Bergland.

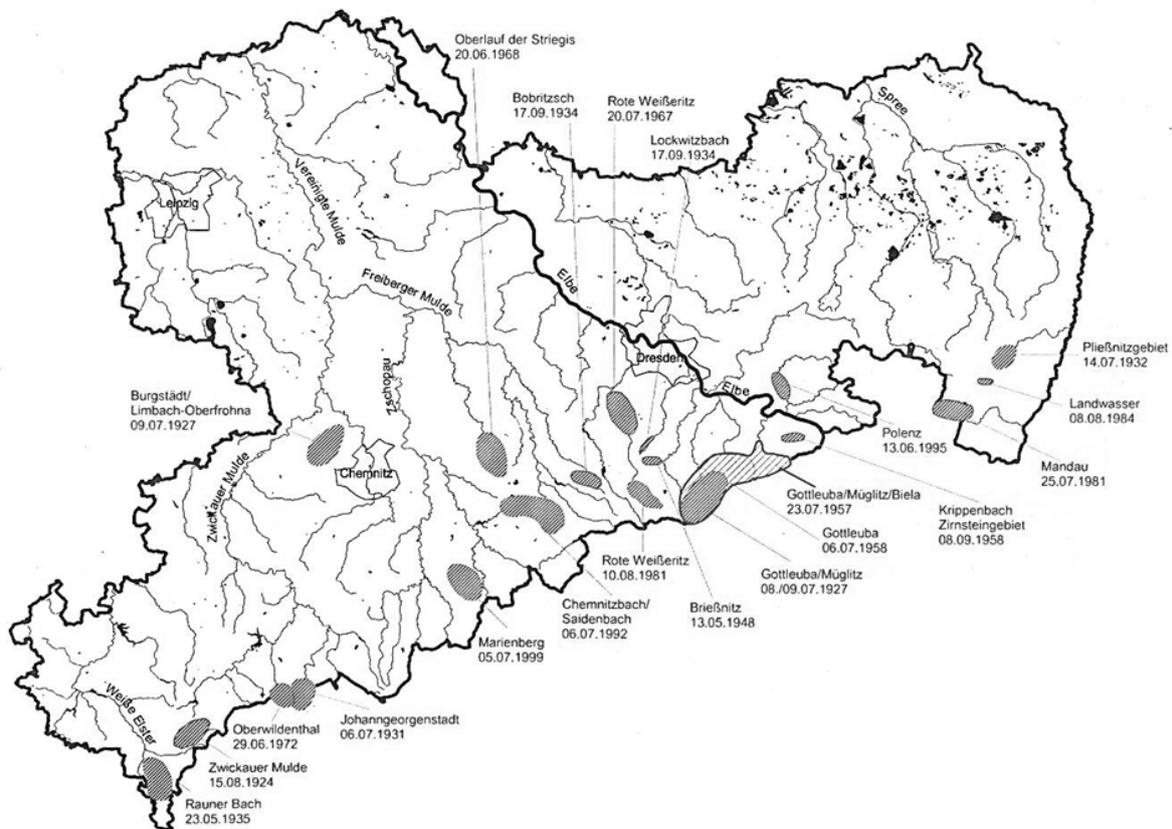
Das – bezogen auf einen bestimmten Punkt im Raum – sehr seltene Auftreten kleinräumiger Starkregenereignisse macht eine Bewertung des zugrunde liegenden Häufigkeitsregimes schwierig. Noch schwieriger ist eine Bewertung rezenter oder gar zukünftiger, projizierter Veränderungen des raum-zeitlichen Auftretens kleinräumiger Starkregen; robuste Aussagen hinsichtlich Stärke und Signifikanz von Änderungssignalen sind umso schwieriger, je kleinräumiger, kürzer und extremer ein Ereignis ist. Auswertungen des DWD im Nachgang der lokal massiv schadensträchtigen Ereignisse in Süddeutschland Ende Mai/Anfang Juni 2016 stützen diese These, vor allem mit Blick auf Ereignisandauern kleiner 24 Stunden (BECKER ET AL., 2016). Es ist mittlerweile anerkannter Stand der Wissenschaft, dass bei generell steigender Temperatur der Atmosphäre auch von einem Anstieg der Intensität kleinräumiger, kurzer konvektiver Starkregen auszugehen ist (BERG ET AL., 2013). Das wiederum bedeutet mit Blick auf Sachsen, dass die Häufigkeit schadensträchtigen Starkregenereignissen zukünftig potentiell zunimmt.

<sup>1</sup>Auch vor dem 20. Jahrhundert gab es lokale Ereignisse in Folge von Starkregen mit teilweise katastrophalen Auswirkungen, wie beispielsweise POHL (2003) belegt.

<sup>2</sup>Mit einem geeigneten Maximierungsansatz wie beispielsweise bei PAVLOVIC ET AL. (2016).

**Tabelle 3.1.1:** Ausgewählte schadensträchtige kleinräumige Hochwasserereignisse in Sachsen in den vergangenen 100 Jahren (Anzahl: 23).

Datum	Lokalisierung	Direkt betroffene Gewässer	Lokale Spitzenintensitäten	Quelle
15.08.1924	Wasserscheide zur Weißen Elster	Oberlauf der Zwickauer Mulde	> 120 mm in kurzer Zeit	FICKERT & SCHMIDT (1934)
Juni 1926	Lausitz	Löbauer Wasser, Spree, Mandau	k. A.	FICKERT (1932b)
08./09.07.1927	Osterzgebirge	Gottleuba/Müglitz	> 200 mm · 6 h <sup>-1</sup>	ALT & FICKERT (1936)
09.07.1927	Burgstädt/ Limbach-Oberfrohnna	Brauselochbach, Frohnbach, Johannesbach	k. A.	BÜTTNER ET AL. (2001)
06.07.1931	Johanngeorgenstadt/ Westerzgebirge	Oberlauf des Schwarzwassers	170 mm · 5 h <sup>-1</sup> ; 25 mm · 10 min <sup>-1</sup>	FICKERT (1932a)
14.07.1932	Bernstadt a. d. Eigen	Pließnitz, Kemnitzbach	> 200 mm · 2 h <sup>-1</sup>	FICKERT (1936)
17.09.1934	Osterzgebirge	Bobritzsch, Lockwitzbach	k. A.	POHL (2003); SMUL (2002)
23.05.1935	Landwüst/ Vogtland	Rauner Bach	200–300 mm · 3–4 h <sup>-1</sup>	FLACH & FICKERT (1936)
20.07.1955	Mittleres Erzgebirge	Preßnitz	k. A.	LFULG (2016a)
23.07.1957	Osterzgebirge	Gottleuba, Müglitz, Biela	k. A.	POHL (2003); SMUL (2002)
06.07.1958	Osterzgebirge	Gottleuba, Müglitz, Weißeritz	k. A.	POHL (2003); SMUL (2002)
20.07.1967	Dippoldiswalde, Freital	Rote Weißeritz	k. A.	POHL (2003)
20.06.1968	Mittleres Erzgebirge	Oberlauf der Striegis	k. A.	LFULG (2016a)
29.06.1972	Wildenthal	Große Bockau	k. A.	OFM (1972)
25.07.1981	Seiffhennersdorf, Großschönau	Mandau	k. A.	SMUL (2002)
10.08.1981	Oberlauf Rote Weißeritz	Rote Weißeritz	k. A.	POHL (2003); SMUL (2002)
08.08.1984	Niederoderwitz/ Oberlausitz	Landwasser	k. A.	POHL (2003); SMUL (2002)
06.07.1992	Mittleres Erzgebirge	Chemnitzbach, Saidenbach	> 170 mm · 4 h <sup>-1</sup>	LFULG (2016a)
13.06.1995	Unteres Polenztal	Polenz	k. A.	SMUL (2002)
05.07.1999	Marienbergl/ Mittleres Erzgeb.	Schwarze Pockau, Rote Pockau, Schlettenbach	> 150 mm · 2 h <sup>-1</sup>	BÜTTNER ET AL. (2001)
15./16.08.2010	Ostsachsen, Osterzgebirge, Sächs. Schweiz	Diverse	50 mm · 60 min <sup>-1</sup> ; > 80 mm · 24 h <sup>-1</sup>	LFULG (2013a)
09.06.2013	Hochkirch, Weissenberg, Niederoderwitz	Kotitzer Wasser, Landwasser, Grundwasser	40 mm · 10 min <sup>-1</sup>	LFULG (2015); RADOLAN
14.05.2017	Spitzkunnersdorf	Spitzkunnersdorfer Bach	> 30 mm · 20 min <sup>-1</sup>	RADOLAN



**Abbildung 3.1.1:** Übersicht lokaler sommerlicher Starkniederschlagsereignisse mit katastrophalen Auswirkungen im 20. Jahrhundert. Veröffentlicht in SMUL (2002), entnommen aus POHL (2003); in der Kartendarstellung fehlen gegenüber Tabelle 3.1.1 die kleinräumigen Ereignisse aus 2010, 2013 sowie 2017.

**Schlussfolgerung 16:** *Rezente Veränderungen im Häufigkeitsregime kleinräumiger Starkregenereignisse mit Andauern kleiner 24 Stunden sind derzeit nicht sicher nachweisbar. Bemerkenswert ist das gehäufte Auftreten solcher Ereignisse in Sachsen von Ende Juni bis Mitte August.* ❖

### 3.2 Untersuchungen zur kleinräumigen hydrologischen Modellierung und Vorhersage im Zuge von RIMAX

Vor dem Hintergrund des Hochwasser 2002 und der dabei sichtbar gewordenen Defizite im Hochwasserrisikomanagement (siehe beispielsweise LFUG, 2004) wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) die Förderaktivität „Risikomanagement extremer Hochwasserereignisse – RIMAX“ aufgelegt (MERZ ET AL., 2009). Zwi-

schen 2005 bis 2010 wurden 38 Teilprojekte mit einem Budget von ca. 20 Millionen Euro gefördert. Im Fokus der RIMAX-Aktivitäten waren Sachsens Flussgebiete, insbesondere das Muldegebiet. Ein Teilaspekt von RIMAX war die methodische Verbesserung der kleinräumigen meteorologischen und hydrologischen Vorhersage in kleinen, schnell reagierenden Einzugsgebieten sowie die konsequente Einbeziehung und Verarbeitung von Unsicherheiten. Tabelle 3.2.1 gibt eine Übersicht über RIMAX-Teilprojekte mit Bezug zum Freistaat Sachsen.

Die Untersuchungen verwendeten dabei einen breiten Reigen datengetriebener, deterministischer und probabilistischer meteorologischer und hydrologischer Methoden, stets mit dem Blick auf deren operationelle Anwendbarkeit und deren Potential zur Verbesserung der Hochwasservorhersage. Zusammenschauend muss man dem Projekt attestieren, dass – trotz erheblicher methodischer und technischer Anstrengungen – die Vorhersagbarkeit und Vorhersagegüte extremer Hochwasser in kleinen Einzugsgebieten nicht grundlegend verbessert werden konnten. Das ist

**Tabelle 3.2.1:** Auswahl von Untersuchungen zur kleinräumigen hydrologischen Modellierung in RIMAX.

Projekt	Beschreibung/Projektziele	Publikationen	Gebiete	Erkenntnisse	Produkte
<b>RIMAX-Projekt 4</b>	Nutzung künstlicher neuronaler Netze zur Bereitstellung von Entscheidungsgrundlagen für operative und planerische wasserwirtschaftliche Maßnahmen	CULLMANN (2007); PHILIPP ET AL. (2008); CULLMANN ET AL. (2008); SCHMITZ ET AL. (2008); PETERS (2007)	Obere Freiberger Mulde (Schwarze Pockau)	KNN geeignet für operationelle hydrologische Vorhersage; Probleme der Parameteridentifizierbarkeit	Neuronale N-A-Modelle (inkl. Hydrodynamik); rechenschnelle Unsicherheitsverarbeitung; zeitveränderliche Prozessparameter
<b>RIMAX-EXTRA</b>	Bestimmung und Analyse von Extremniederschlägen für kleine und mittlere Einzugsgebiete in Mittelgebirgen in Echtzeit mit erhöhter Redundanz	BERNHOFER ET AL. (2009); PLUNTKE ET AL. (2010); JATHO ET AL. (2010)	Chemnitz, Würschnitz, Wilzsch	Integration aller Datenquellen (Ombrometer, Radar, Satellit) bringt Mehrwert	Kombination von Radar- und Satelliten-QPEs; Analysewerkzeug für die Echtzeit-Diagnose extremer Niederschlagsereignisse
<b>RIMAX-OPAQUE</b>	Operationelle Abfluss- und Hochwasservorhersage in Quellgebieten	KNEIS & HEISTERMANN (2009); KNEIS ET AL. (2012); HEISTERMANN ET AL. (2013); ITZEROTT (2010)	Weißberitz	Radar-QPEs sind unabdingbar; Möglichkeiten und Grenzen der operationellen Abflussvorhersage	Radar-Bibliothek WRADLIB; Merging-Verfahren und Nowcasting; Prototyp Hochwasserrührwarnsystem Baden-Württemberg
<b>RIMAX-HORIX</b> sowie ko-härentes DFG-Projekt HW-Vorhersage	Entwicklung eines operationell einsetzbaren Expertensystems zum Hochwasserrisikomanagement unter Berücksichtigung der Vorhersageunsicherheit; Hochwasservorhersage für schnell reagierende Einzugsgebiete unter Berücksichtigung der Unsicherheit	CULLMANN ET AL. (2009); GRUNDMANN (2010); BLIEFERNICHT (2010); PAKOSCH (2011); CULLMANN ET AL. (2011); KRAUSSE ET AL. (2012); KRAUSSE (2013)	Obere Freiberger Mulde (Schwarze Pockau)	Unsichere Parameter sind korreliert; Unsicherheiten sind raum-zeitlich hoch variabel; Niederschlagsverteilung Hauptunsicherheitsquelle; Dateniefe als Verfahren zur Bestimmung robuster Parameter	Gesamtheitliche Unsicherheitsbetrachtung; Aufdeckung struktureller Modelldefizite; Fuzzy-Vorhersagesystem; prob. QPFs für kleine Einzugsgebiete; Robust Parameter Estimation Framework (ROPE)
<b>RIMAX-Projekt 17</b>	Entwicklung integrativer Lösungen für das operationelle Hochwassermanagement am Beispiel der Freiberger Mulde	SCHUMANN ET AL. (2009)	Freiberger Mulde	QPF-Ensembles bedürfen u. U. einer Kalibrierung; Multi-Model-Ensembles zur Analyse der Modellstrukturunsicherheit	Prozessorientiertes Hochwasser- vorhersagemodell mit Zustandsnachführung

weniger ein Defizit des Projekts, sondern vielmehr zeigt das Projekt in seiner Breite und Tiefe damit deutlich die Möglichkeiten, aber vor allem die Grenzen kleinräumiger hydrologischer Vorhersagen auf. Die wichtigsten Erkenntnisse und Empfehlungen aus RIMAX lauten wie folgt:

- Deterministische hydrologische Modelle sind prinzipiell für die kleinräumige hydrologische Modellierung geeignet; allerdings wird ihr Nutzen durch die räumlich schwankende Identifizierbarkeit und Gültigkeit ihrer Modell- und Prozessparameter geschmälert. Einfache, beispielsweise datengetriebene Modelle müssen daher nicht zwangsläufig schlechter performen und können sogar operationelle Vorteile, wie Rechenschnelle und Robustheit bieten (CULLMANN ET AL., 2008; PAKOSCH, 2011).
- Die Integration aller potentiell verfügbaren Daten kann einen echten Mehrwert mit Blick auf die Güte hydrologischer Vorhersagen für kleine Einzugsgebiete bedeuten. Ganz aktuell bekommt der Befund neue Bedeutung durch die zunehmende Verfügbarkeit von Mobilgeräten oder Alltagsgegenständen<sup>1</sup> mit Low-Cost-Sensorik (via Crowdsourcing<sup>2</sup>) sowie Social-Media-Vernetzung durch Plattformen wie Twitter oder Facebook (BERNHOFER ET AL., 2009).
- Radar ist unabdingbar bei der kleinräumigen hydrologischen Vorhersage und Warnung. Nowcasting-Verfahren (Kürzestfristvorhersagen auf Radar-Basis) können einen (wenn auch häufig schmalen) Vorhersagenutzen gegenüber quantitativen Niederschlagsvorhersagen auf Basis von numerischen Wettermodellen haben. Mittel- und langfristige Vorhersagen (Vorhersageweite größer 24 h) haben oftmals keine signifikante Güte mit Blick auf kleine Einzugsgebiete (KNEIS & HEISTERMANN, 2009; KNEIS ET AL., 2012).
- Die Einbeziehung probabilistischer quantitativer Niederschlagsvorhersagen kann einen prädiktiven Nutzen bedeuten. Eine umfassende Unsicherheitsbetrachtung ist wichtig, aber methodisch und technisch sehr aufwändig (SCHUMANN ET AL., 2009; GRUNDMANN, 2010; BLIEFERNICHT, 2010).

<sup>1</sup> Beispielsweise Regensensoren in Autos.

<sup>2</sup> Crowdsourcing meint die Philosophie viele, eher ungenaue Daten zu erheben und zu integrieren und dadurch ein stimmiges Gesamtbild zu erhalten.

**Schlussfolgerung 17:** *Trotz erheblicher methodischer und technischer Anstrengungen und des wissenschaftlichen Fortschritts wird sich die operationelle Vorhersagbarkeit extremer, kleinräumiger Hochwasserereignisse als Folge konvektiver Starkregen in den kommenden Jahren nicht grundlegend verbessern. Gleichsam sollte der Mehrwert probabilistischer Methoden genutzt werden; dazu ist die Schaffung und Wahrung der Bereitschaft zum Empfang und zur Interpretation probabilistischer Vorhersage-/Warnprodukte bei potentiellen Nutzern notwendig.* ❖

### 3.3 Schlussfolgerungen, Defizite, Synthese – Fragen, die das Projekt adressieren muss

Der Abriss kleinräumiger sowie schadensträchtiger Ereignisse (Abschnitt 3.1) illustriert recht eindrücklich die ausgeprägte Häufigkeit solcher Ereignisse, bezogen auf ganz Sachsen. Eine Vielzahl der Untersuchungen belegt die Schwierigkeiten und Grenzen der kleinräumigen hydrologischen Vorhersage. Besonders ist hier das mit Blick auf den Freistaat wichtige RIMAX-Vorhaben (2005–2010; siehe Abschnitt 3.2) zu nennen. Die RIMAX-Einzelvorhaben waren dabei allerdings immer recht spezifisch und bezogen meist nur ein oder wenige Elemente mit ein, welche für eine ganzheitliche Frühwarnung gemäß Abbildung 2.0.1 bzw. für ein effektives, verlässliches und adressatengerechtes Frühwarnsystem notwendig sind. Ein Projekt, welches als Ziel die Konzeption, Erstellung, Testung sowie Operationalisierung eines solchen Systems verfolgt, muss daher die folgenden Aspekte berücksichtigen:

- Das Projekt muss antizipieren, dass neben der rein hydrologischen Bewertung und Prognose der kleinräumigen Hochwassergefährdung auch Aspekte wie Erstellung und Verteilung von Warnprodukten sowie Risikokommunikation wichtig sind. Diese Punkte sollten auf die Nutzerbedürfnisse angepasst sein.
- Dazu müssen diese Nutzeransprüche erhoben und bewertet werden.

- Bei RIMAX stand die Bewertung des Potentials verschiedener hydrologischer Modellverfahren für die hydrologische Vorhersage/Prognose mit Blick auf kleinräumige Extremereignisse im Fokus. Dieser Aspekt ist wichtig, allerdings auch in dem Sinne, dass – mit Blick auf die Erfordernisse des angestrebten operationellen Betriebs des Systems – ein Ansatz gewählt werden sollte, der so komplex wie nötig und so einfach wie möglich ist.
- Es ist anzuerkennen, dass die Hauptunsicherheit für eine kleinräumige hydrologische Vorhersage und Warnung in der Unsicherheit der Niederschlagsvorhersage begründet liegt. Diese Tatsache ist entsprechend zu berücksichtigen, beispielsweise durch die Verarbeitung und Propagation von Unsicherheiten (siehe auch Abschnitt 2.5.1) entlang des gesamten Frühwarnprozesses (siehe Abbildung 2.0.1) und durch Ableitung und Verteilung von Produkten, die dieser Philosophie folgen.<sup>1</sup>
- Die vorgenannten Aspekte müssen zusammenschauend untersucht werden. Dabei erscheinen pilothafte<sup>2</sup> Vergleichsstudien geeignet.

### 3.4 Das Frühwarnprojekt: Vorgehen hin zu einem operationellen Hochwasserfrühwarnsystem für Sachsen

Das Projektvorhaben trägt den Titel „Konzeption, Umsetzung sowie Operationalisierung eines Systems zur Ableitung und Bereitstellung von Produkten zur Bewertung und Prognose der regionalen Hochwassergefährdung für kleine Einzugsgebiete in Sachsen“ und wurde vom Sächsischen Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft (SMUL) als Vorhaben Nummer 030479 im Rahmen des Landesprogramms „Optimierung der bestehenden Meldesystem in Zusammenhang mit dem Hochwasser 2010 – Umsetzung der Empfehlungen der Jeschke-Kommission“ finan-

<sup>1</sup>Das können beispielsweise typische Produkte wie Gangliniengrafiken mit Unsicherheitsbändern sein. Explizit sind hier aber auch Produkte gemeint, die Unsicherheit inhärent berücksichtigen indem beispielsweise eine Warninformation generell für ein größeres Gebiet gilt und es vermieden wird, lokale oder gar punktuelle Aussagen zu treffen.

<sup>2</sup>Also für ausgewählte Gebiete/Regionen Sachsens.

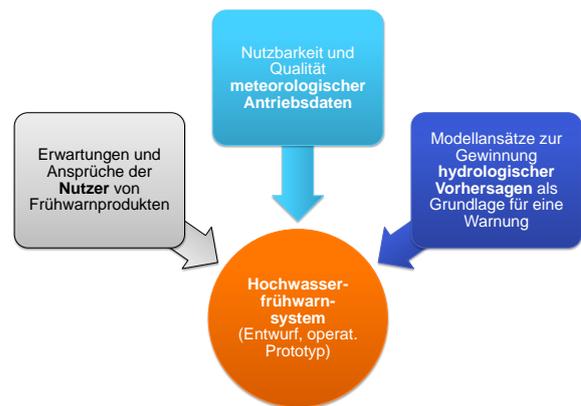


Abbildung 3.4.1: Untersuchungsschwerpunkte auf dem Weg hin zu einem Hochwasserfrühwarnsystem für Sachsen.

ziert (Laufzeit 2013 bis 2017). Die im vorangegangenen Abschnitt 3.3 herausgearbeiteten Anforderungen für ein operationelles Hochwasserfrühwarnsystem werden zu einem Vorgehensmodell strukturiert, welches im Folgenden detailliert beschrieben wird.

#### 3.4.1 Synergetischer Projektansatz

Wie bereits einleitend in den Kapiteln 1 und 2 ausgeführt, muss ein effektives, verlässliches sowie adressatengerechtes Hochwasserfrühwarnsystem verschiedene Aspekte mit einbeziehen. Für das Projekt wurden daher drei wesentliche Bereiche festgelegt, welche zusammenschauend für Sachsen betrachtet und untersucht werden (siehe Abbildung 3.4.1). Es sind dies:

1. Ansprüche und Erwartungen der Nutzer von Frühwarnprodukten,
2. Qualität der meteorologischen Antriebsdaten sowie
3. Modellvorhersagen als Grundlage von Warnungen.

Für diese Bereiche soll – gemäß dem Stand von Wissenschaft und Technik (siehe Kapitel 2) und spezifisch für die Bedingungen im Freistaat – zunächst herausgefunden werden, was die aktuellen Möglichkeiten, aber vor allem auch die Grenzen bei der Hochwasserfrühwarnung sind. Als abschließende Aktivität des Projekts wird ein begründeter Entwurf eines Frühwarnsystems implementiert und fortan durch das LHWZ operationell betrieben. Damit trägt das Projekt maßgeblich zur Erfüllung der entsprechenden Forderungen der Jeschke-Kommission (JESCHKE ET AL.,

2010) bei. Projektorganisation, -ablauf sowie die konkreten Projekthinhalte und Meilensteine werden im Folgenden beschrieben.

### 3.4.2 Projektorganisation und Projektablauf

Das Projekt wurde zunächst inhaltlich (ohne nachzubereitende und fortführende Aktivitäten) auf eine Dauer von 3,5 Jahren (07/2013 bis 12/2016) angelegt, wobei sich der tatsächliche Projektstart – durch in Zusammenhang mit dem Hochwasser 2013 stehender Aktivitäten des LHWZ – in den Herbst 2013 verschoben hatte. Das Projekt wurde von einem festen Dienstposten geleitet (Projektleitung), womit auch die weitere Betreuung des avisierten operationellen Systems und seiner Warnprodukte gegeben ist. Inhaltliche Mitarbeit wurde im Zeitraum 05/2014 bis 12/2016 durch eine volle Projektstelle (befristet) gewährleistet.

Der geplante und umgesetzte Projektablauf mit seinen eins plus vier Einzelphasen ist in Abbildung 3.4.2 dargestellt sowie in Tabelle 3.4.1 näher erläutert. Der Projektablauf spiegelt dabei ein Vorgehen wider, angelegt zur Synthese von vergleichenden Einzelbetrachtungen, hin zu einem begründeten Entwurf für das Gesamtsystem; damit liegt ein dem Projektansatz (siehe Abschnitt 3.4.1) gerecht werdendes Vorgehensmodell vor. Aktivitäten des Projektmanagements, wie Zeit- und Ressourcenplanung, Abbildung und Berücksichtigung inhaltlicher und organisatorischer Abhängigkeiten, Controlling, oder aber Dokumentation, wurden mit geeigneten Werkzeugen (z. B. Gantt-Diagramme<sup>1</sup>, Burn-Down-Charts<sup>2</sup>, Meilensteintrendanalyse<sup>3</sup>) unterstützt. Beispielsweise zeigt Abbildung 3.4.3 eine typische, im Projekt benutzte Management-Sicht zur Darstellung inhaltlicher Abhängigkeiten sowie des Erfüllungsgrades von Projektmeilensteinen.

### 3.4.3 Projektaktivitäten (Meilensteine)

In den einzelnen Projektphasen zwei bis fünf wird der Projektansatz innerhalb von neun Meilenstein-Maßnahmen methodisch umgesetzt (siehe Tabelle 3.4.2) – es gibt also eine Analogie zwischen dem synergetischen Projektansatz

und dem konkreten Vorgehen. Als Ergebnis steht ein operationelles System für Abschätzung der regionalen Hochwassergefährdung sowie zur Ableitung und Präsentation von Warninformationen.

Meilenstein-Maßnahme 1 widmet sich der Erhebung von Erwartungen und Ansprüchen potentieller Nutzer eines Hochwasserfrühwarnsystems in Sachsen. Mittels einer Online-Befragung wurden von einem Großteil der offiziellen Informationsempfänger (gemäß HWMO/HWNAVO) wertvolle Informationen gewonnen, ausgewertet und für die weiteren Projektschritte antizipiert.

Die Maßnahmen Nummer 2 und 7 adressieren Fragen der Qualität quantitativer Niederschlagsvorhersageprodukte, beispielsweise, was mit ausreichender Güte abdeckbare Vorhersagezeiträume sind, oder für welche Einzugsgebietsgrößen noch verlässliche QPFs zu erwarten sind. Weiterhin zentral ist die Frage, ob durch die Verwendung probabilistischer Antriebe ein echter Benefit für die operationelle Hochwasserfrühwarnung zu erwarten ist.

Die Maßnahmen 3, 4, 6 und 8 widmen sich grundlegenden Untersuchungen zur Eignung eines breiten Spektrums hydrologischer Modellansätze zur Ableitung von Vorhersagen/Prognosen als Grundlage einer Hochwasserfrühwarnung. Die das Projekt abschließende Maßnahme 9 beherbergt die konkrete Konzeption, Umsetzung und Operationalisierung eines Hochwasserfrühwarnsystems für Sachsen. Zunächst (ab 2017) werden Warnprodukte auf dem Webportal des LHWZ präsentiert (ähnlich zu den Lösungen der Bundesländer Baden-Württemberg, Hessen sowie Rheinland-Pfalz (siehe Abschnitt 1.6.1); eine pro-aktive Verteilung von Warnungen erfolgt zunächst nicht (obgleich es Konsens ist, dass diese für eine effektive, verlässliche sowie adressatengerechte Hochwasserfrühwarnung unabdingbar ist), da die Rolle einer Hochwasserfrühwarnung innerhalb des hoheitlichen Hochwassernachrichten- und Alarmdienstes noch zu klären sein wird.

Die Meilenstein-Maßnahmen 1–4 sowie 6–8 werden anhand von Pilotstudien in Teil II vorgestellt bzw. sind in den in Tabelle 3.4.2 zu findenden Referenzen dokumentiert. Die Implementierung des Hochwasserfrühwarnsystems wird in Teil III beleuchtet. Der Projektworkshop (Maßnahme 5) wird im Folgenden besprochen.

<sup>1</sup>Wikipedia: <https://de.wikipedia.org/wiki/Gantt-Diagramm> (abgerufen am 22.09.2016).

<sup>2</sup>OpenPM: <https://www.openpm.info/display/openPM/Burndown-Chart> (abgerufen am 22.09.2016).

<sup>3</sup>OpenPM: <https://www.openpm.info/display/openPM/Meilensteintrendanalyse> (abgerufen am 22.09.2016).

**Tabelle 3.4.1: Projektablauf chronologisch nach Projektphasen.**

Projektphase:	① Initialisierung	② Nutzerbefragung	③ Methodische Voruntersuchungen	④ Feinkonzept HWFWS sowie Untersuchungen zur regionalen Übertragbarkeit	⑤ Implementierung, Betrieb, Bewertung und ggf. Verbesserung des HWFWS
Zeitraum:	07/13–12/13	07/13–03/14	04/14–12/15	01/16–11/16	06/16–1/16 ff.
Inhalte:	Konzeption, Stellenplanung, Bedarfsplanung	Erhebung von Erwartungen und Ansprüchen potentieller Nutzer eines Hochwasserfrühwarnsystems	Pilothafte Untersuchungen zur Qualität meteorologischer Antriebsdaten sowie zur Eignung bestimmter hydrologischer Modellansätze	Erstellung eines konkreten Systementwurfs eines sächsischen HWFWS unter Berücksichtigung von Möglichkeiten und Grenzen	Entwurfsgerechte Implementierung in die operationelle Infrastruktur des LHWZ sowie operat. Bereitstellung von Frühwarnprodukten (2017 ff.)
Begleitend:	Projektplanung, Projektsteuerung, Vergabemanagement, Produktmanagement, Controlling, wissenschaftliche Präsentationen und Veröffentlichungen, Öffentlichkeitsarbeit				



**Tabelle 3.4.2:** Meilenstein-Maßnahmen im Projekttablauf Mitte 2013 bis Ende 2016 (chronologisch geordnet).

Phase	Nr.	Titel der Maßnahme	Beschreibung und Inhalt	Ausführung	Laufzeit	Vertragsart	Referenz
②	1	Nutzerstudie	Erhebung von Erwartungen und Ansprüchen pot. HWWFWS-Nutzer	LHWZ	07/13–03/14	Interne Aktivität	PHILIPP ET AL. (2015)
	2	Verifikation quantitativer Niederschlagsvorhersageprodukte	Verifikations-Vorstudie (Datenzeitraum 04/1–06/14)	LHWZ	07/14–05/15	Interne Aktivität	KERL & PHILIPP (2015)
③	3	Entwicklung und beispielhafte Anwendung deterministischen und datengetriebenen Methoden	Entwicklung DaHM* und DaHM* sowie Pilotuntersuchungen	TUD	07/15–1/15	FUE-Vertrag <sup>§</sup> sowie Masterarbeit	SCHWARZE ET AL. (2015); SINGER (2015)
	4	Entwicklung und beispielhafte Anwendung von FSAPs <sup>§</sup>	Entwicklung ScoHM <sup>#</sup> sowie Pilotuntersuchungen	LHWZ TUD	10/15–02/16	Masterarbeit und Interne Aktivität	METZKES (2016); PHILIPP ET AL. (2016)
④	5	Projektworkshop	Siehe Abschnitt 3.5	LHWZ	11/15	–	–
	6	Ereignisbezogene Hindcast-Validierung der entwickelten determ./datengetr. Methoden	Hindcast-Validierung von determ./datengetr. Methoden und Prüfung der räumlichen Übertragbarkeit	TUD	01/16–04/16	Forschungs- und Entwicklungsvertrag	SCHWARZE ET AL. (2015)
7	7	Verifikation probabilistischer quantitativer Niederschlagsvorhersageprodukte	Verifikation von COSMO-DE-EPS und Untersuchung des Einflusses probabilistischer Antriebsdaten auf die hydro. Modellierung	TUD	01/16–05/16	Werkvertrag	SCHÜTZE ET AL. (2016)
	8	Flächendeckende Anwendung und Validierung von deterministischen, datengetriebenen sowie Scoring-Modellen	Flächendeckende Anwendung, Gütevergleich, Bewertung der räumlichen Übertragbarkeit von DaHM, DaHM und ScoHM	TUD	06/16–1/16	Werkvertrag	SCHÜTZE ET AL. (2017)
⑤	9	Konzeption, IT-technische Implementierung und Operationalisierung einer Perspektive zur HW-Frühwarnung	Implementierung von ScoHM als Perspektive in KALYPSO <sup>~</sup>	BCE+	06/16–1/16	EVB-IT-Erstellungsvertrag <sup>§</sup>	BCE (2016b); BCE (2016a)

<sup>§</sup>Flood Susceptibility Assessment Procedures (siehe Abschnitt 2.2.3); \* deterministisches und datengetriebenes hydrologisches Modell (Eigennamen); <sup>#</sup>Scoring-Modell (FSAP-Modell) nach METZKES (2016) und PHILIPP ET AL. (2016); <sup>~</sup>Open-Source-Framework für die operationalen Modelle im LHWZ; siehe auch [https://de.wikipedia.org/wiki/Kalypso\\_\(Software\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Kalypso_(Software)); <sup>+</sup>Björnsen Beratende Ingenieure GmbH Koblenz; <sup>§</sup>Forschungs- und Entwicklungsvertrag; <sup>§</sup>EVB-IT: Ergänzende Vertragsbedingungen für die Beschaffung von IT-Leistungen.



Abbildung 3.4.2: Übersicht der fünf Projektphasen.

**Schlussfolgerung 18:** Dem notwendigen synergetischen Vorgehensmodell entsprechend ist es zweckmäßig, die Aspekte (a) Ansprüche und Erwartungen der Nutzer von Frühwarnprodukten, (b) Qualität der meteorologischen Antriebsdaten sowie (c) Modellvorhersagen als Grundlage von Warnungen zu untersuchen und zu bewerten. ❖

### 3.5 Der Projektworkshop im November 2015

Im Rahmen des Projekts (Meilenstein Nummer 5 des Gesamtprojekts; siehe Tabelle 3.4.2) fand im November 2015 am LHWZ ein zweitägiger Experten-Workshop mit rund 20 Teilnehmern aus Praxis und Forschung statt (siehe Teilnehmerliste in Tabelle 3.5.1). Organisatorisch war der Workshop in mehrere Blöcke unterteilt, die jeweils aus einer Präsentation des Arbeitsstandes des Frühwarnprojekts (entsprechend der bis dato verfügbaren und hierin in Teil II dargestellten Ergebnisse der Pilotstudien), einem Impulsreferat eines Experten sowie einer gemeinsamen Diskussion aller Teilnehmer bestanden. Die Hauptthemen waren dabei (entsprechend des Projektansatzes – Abschnitt 3.4.1):

- Nutzeransprüche und Kommunikation/Akzeptanz von Frühwarnungen (Impulsreferat von Herrn Dr. Kuhlcke, UFZ: „Anforderung an Risikokommunikation/Frühwarnung aus sozialwissenschaftlicher Sicht“),<sup>1</sup>
- Qualität der meteorologischen Eingangsdaten (Impulsreferat von Frau Dr. Rauthe, DWD: „Verifikationsergebnisse verschiedener Niederschlagsvorhersagen für kleine Einzugsgebiete und deren raum-zeitlich abhängige Vorhersagegüte“) sowie

- Ansätze zur operationellen Bewertung der aktuellen Warnsituation (Impulsreferat von Herrn Demuth, LfURP: „Erfahrungen in der Frühwarnung für kleine Einzugsgebiete am Beispiel des Hochwasserfrühwarnsystems für Rheinland-Pfalz“).

In einer abschließenden Diskussion wurden die Erfahrungen der Teilnehmer sowie die während des Workshops gewonnenen Erkenntnisse synthetisiert und mittels eines Whiteboard-Bildes festgehalten (siehe Abbildung 3.5.1). Bei der Diskussion wurde ganz zentral deutlich, dass die im Bericht der Jeschke-Kommission (JESCHKE ET AL., 2010) geforderten Aktivitäten hin zu einem Hochwasserfrühwarnsystem einerseits wichtig und notwendig sind. Andererseits erweckt die im Bericht direkt aufgemachte Forderung nach einem Frühwarnsystem möglicherweise auch überzogene Erwartungen bezüglich der Möglichkeiten dazu; eine breitere Basis hinsichtlich der hydro-meteorologischen Randbedingungen sowie hinsichtlich wissenschaftlich-technischer Möglichkeiten und Grenzen (vergleiche Abschnitte 3.1 und 3.2) könnte auf solchen Berichten basierende fachpolitische Entscheidungen und Erwartungen präziser machen.

Abbildung 3.5.1 liefert eine kompakte Übersicht der wichtigsten Erkenntnisse und Sichtweisen des Workshops bezüglich des Komplexes Hochwasserfrühwarnung für kleine Einzugsgebiete. Die Kernaussagen aus der Workshop-Diskussion sollen im Folgenden kurz zusammengefasst werden.

<sup>1</sup> Das Referat musste entfallen, da der Referent kurzfristig nicht anwesend sein konnte. Die Folien des Vortrages standen dem Plenum aber als Diskussionsgrundlage zur Verfügung.

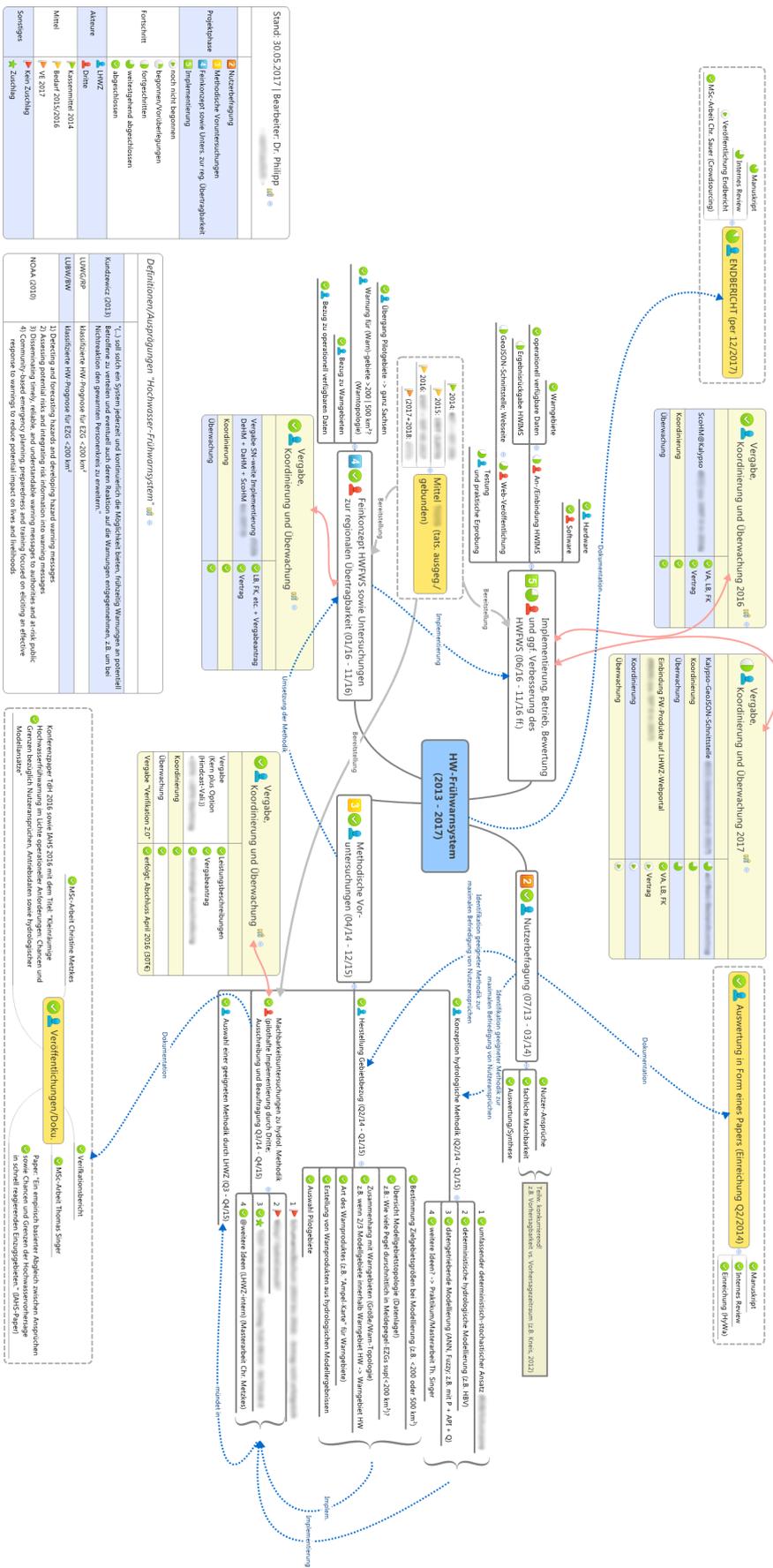


Abbildung 3.4.3: Projektmanagement-Sicht auf den Projektablauf zur Illustration der Komplexität des Vorhabens. Die Initialisierungsphase (Projektphase 1) ist aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht mit dargestellt. Sensible Daten sind unkenntlich gemacht; Stand: Mai 2017.

**Tabelle 3.5.1:** Teilnehmer beim Workshop „Möglichkeiten und Grenzen der Hochwasserfrühwarnung für kleine Einzugsgebiete in Sachsen“ am 26. und 27.11.2015 im Landeshochwasserzentrum Sachsen.

Nummer	Name	Zugehörigkeit	Herkunft
1	Frau Badde	LUBW	Baden-Württemberg
2	Herr Köck	LfU	Bayern
3	Frau Dr. Rauthe	DWD	Bund
4	Herr Weber	DWD/RWB-LZ	Bund
5	Herr Meyer	NLWKN	Niedersachsen
6	Herr Demuth	LfU	Rheinland-Pfalz
7	Herr Dr. Müller	LfULG	Sachsen
8	Herr Dr. Philipp	LfULG	Sachsen
9	Herr Kerl	LfULG	Sachsen
10	Herr Höhne	LfULG	Sachsen
11	Herr Büttner	LfULG	Sachsen
12	Herr Merker	SMUL	Sachsen
13	Herr Wundrak	SMUL	Sachsen
14	Herr Dr. Jeschke	SMUL, a D.	Sachsen
15	Herr Singer	TUD/LS Hydrologie	Sachsen
16	Herr Dr. Wagner	TUD/LS Hydrologie	Sachsen
17	Herr Prof. Schütze	TUD/LS Hydrologie	Sachsen
18	Frau Metzkes	TUD/LS Hydrologie	Sachsen
19	Frau Behnken	LLUR	Schleswig-Holstein
20	Herr Dr. Hirschhäuser	LLUR	Schleswig-Holstein

### 3.5.1 Erkenntnisse: Nutzeransprüche und Kommunikation/Akzeptanz von Frühwarnungen („Nutzer“)

Warnprodukte sollten aktiv an die Nutzer verteilt werden (Push-Nachrichten, SMS etc.); ein häufig genanntes Vorbild war in diesem Zusammenhang die DWD-App „WarnWetter“.<sup>1</sup> Warnprodukte sollten nicht (wie beispielsweise derzeit noch in Baden-Württemberg praktiziert) auf Landkreise, sondern auf Flussgebiete abbilden. Eine einigermaßen verlässliche Vorhersage ist nur im Bereich weniger Stunden möglich; eine im Verhältnis zum Vorhersagezeitraum häufige Aktualisierung der Vorhersage/Warnung („Update“) wird als notwendig erachtet. Wünschenswert wäre die Einbeziehung der Nutzer als „Citizen Scientists“<sup>2</sup>, um Informationen für die Verifikation von Warnungen zu erhalten.

<sup>1</sup>Die Smartphone-App WarnWetter erlaubt eine standortbezogene Versorgung von Abonnenten mit Wetter- und Warninformationen.

<sup>2</sup>Wikipedia: [https://de.wikipedia.org/wiki/Citizen\\_Science](https://de.wikipedia.org/wiki/Citizen_Science) (abgerufen am 04.09.2016): „Mit Citizen Science (Bürgerwissenschaft) wird im angelsächsischen Sprachraum eine Form der Wissenschaft bezeichnet, bei der Projekte unter Mithilfe oder komplett von interessierten Laien durchgeführt werden. Sie melden Beobachtungen, führen Messungen durch oder werten Daten aus.“

### 3.5.2 Erkenntnisse: Qualität der meteorologischen Eingangsdaten („Daten“)

Die Grenzen des prädiktiven Nutzens quantitativer Niederschlagsvorhersagen in Abhängigkeit von der Größe des Bilanzgebietes und der Vorhersageweite müssen kommuniziert und akzeptiert werden. Dazu müssen diese Grenzen anhand von Verifikationsuntersuchungen bestimmt werden. Eine präzise Vorhersage kleinräumiger, konvektiver Extremereignisse ist mit Mitteln der numerischen Wettervorhersage sowie mit Radar-Nowcasting-Verfahren<sup>3</sup> nicht möglich. Daran wird sich auch in den nächsten Jahren nichts ändern. Die Verwendung probabilistischer Antriebe verspricht einen prädiktiven Mehrwert gegenüber rein deterministischen Antrieben. Allerdings sollte geprüft werden, ob der erhöhte Aufwand dafür (Datenmenge, Verfahren zur Verarbeitung probabilistischer Antriebe, Verfahren zur probabilistischen Ergebnisbewertung) gerechtfertigt ist.

<sup>3</sup>Solche Verfahren beruhen in der Regel auf der raum-zeitlichen Extrapolation vom Radarfeldern. Ein Standard-Verfahren ist RADVOR („Radarvorhersage“) des DWD.

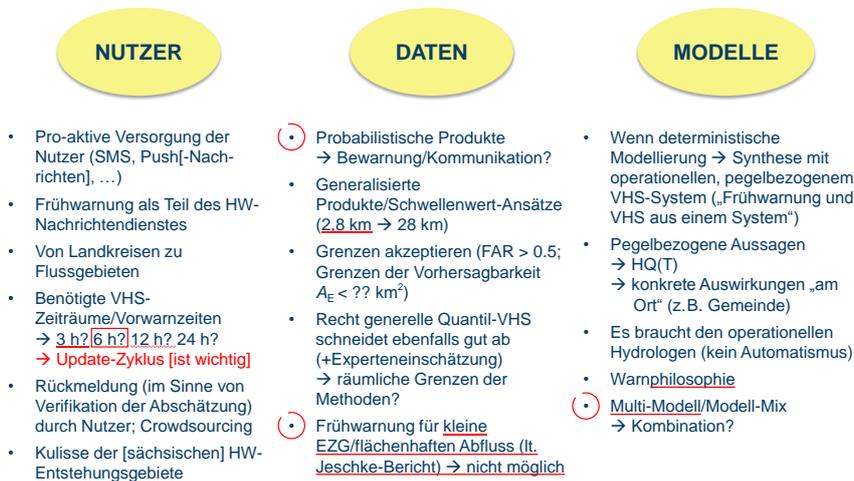
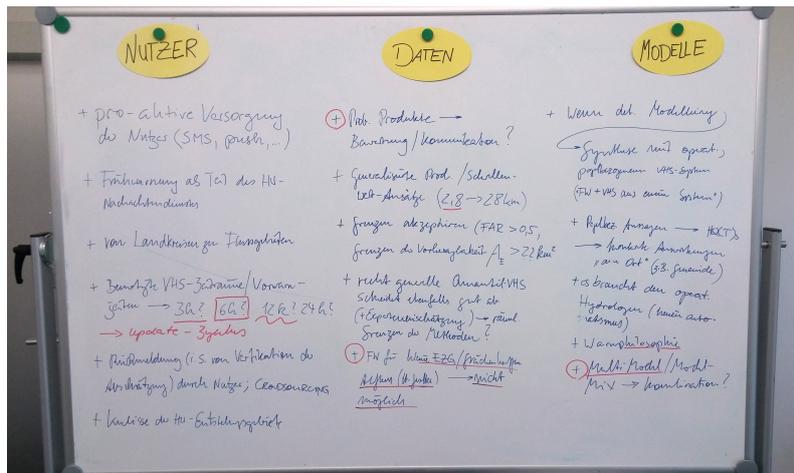


Abbildung 3.5.1: Tafelbild der wichtigsten Ergebnisse und Erkenntnisse des Projektworkshops im November 2015 (oben: Foto; unten: Abschrift).

### 3.5.3 Erkenntnisse: Ansätze zur operationellen Bewertung der aktuellen Warnsituation („Modelle“)

Eine besondere Erfordernis, aber gleichzeitig eine außerordentliche Schwierigkeit, ist die Ableitung eines konkreten Hochwasserrisikos (vergleiche Abschnitt 1.2) i. S. von konkret zu erwartenden Auswirkungen für beispielsweise eine Kommune. Hier stellt sich generell die Frage, wo die

Risikobewertung stattfinden sollte:<sup>1</sup> „oben“, also beim Ersteller der Vorhersage oder aber „unten“, also bei den im Hochwasserrisikomanagement mit direkten Abwehrmaßnahmen befassten Akteuren. Ein weiterer wichtiger Punkt,

<sup>1</sup> Hierzu existieren durchaus verschiedene Auffassungen in der Fachwelt, ziemlich unabhängig davon, ob die Frage von Hydrologen, Soziologen oder Kommunikationswissenschaftlern beantwortet wird. Beispielhafte Wortmeldungen dazu vom Kolloquium „Unsicherheiten in der hydrologischen Vorhersage – quantifizieren, reduzieren, kommunizieren“ an der BfG im September 2013:

E. Sprockereef (Rijkswaterstaat Niederlande): „By publishing a deterministic forecast, the decision is actually already taken by the hydrologist: The critical level will be or will not be reached and therefore measures should or should not be taken. By publishing a probabilistic forecast, the decision about the necessity of measures is put where it belongs: at the crisis manager.“

M. Bremicker (Hochwasservorhersagezentrale Baden-Württemberg): „Eine vollständige Auslagerung der Risikoeinschätzung an die Endnutzer erscheint problematisch.“

der besonders von der Vertretern der Vorhersagezentralen herausgestellt wurde, betrifft die Rolle des Hydrologen bei Erstellung einer Warnung auf Basis von Modellergebnissen. Hier wurde in der Diskussion deutlich, dass eine Warnung nicht Resultat eines Automatismus sein sollte, sondern dass stets für ein operationelles Frühwarnsystem die Möglichkeit des Eingriffs durch einen Experten vorgesehen werden sollte, was dann auch mit entsprechenden Ressourcen unteretzt werden muss (abhängig vom Aktualisierungsintervall, Tageszeit, Wochentag).

**Schlussfolgerung 19:** *Fachleute sind sich generell einig, dass eine Hochwasserfrühwarnung für kleine, schnell reagierende Einzugsgebiete mit prädiktivem Nutzen möglich ist (gegenüber dem Szenario „keine Vorhersage“ oder „würfeln“). Der prädiktive Nutzen („Vorhersagbarkeit“) ist allerdings gemeinhin schmal. Erschwerend kommt hinzu, dass die schadensträchtigen Ereignisse naturgemäß selten sind und bei diesen Ereignissen die Vorhersagbarkeit am geringsten ist.* ❖

## 4 Zusammenfassung Teil I

Extreme Hochwasserereignisse mit erheblichen Schäden für Güter, Infrastruktur sowie Leib und Leben können auch durch kleinräumige, vor allem sommerliche Starkregen hervorgerufen werden; Sachsen war in der Vergangenheit mehrfach von solchen Ereignissen betroffen. Problematisch für das Management solcher Ereignisse ist, dass nur sehr wenig Zeit zwischen Niederschlagsbeginn und dem Abflussanstieg vergeht. Eine Frühwarnung, welche Akteure in die Lage versetzt, vor Ereignisbeginn entsprechende Maßnahmen zu planen oder durchzuführen, kann die Vulnerabilität und somit das Hochwasserrisiko mindern.<sup>1</sup>

Eine Frühwarnung kann dabei lediglich auf Beobachtungen oder aber auf meteorologischen und/oder hydrologischen Vorhersagen basieren. Um einen ausreichenden Vorhersagezeitraum zu gewährleisten, müssen Niederschlagsvorhersagen verarbeitet werden. Durch die großen Unsicherheiten bei der quantitativen Vorhersage kleinräumiger Starkregen, bleibt daher für eine Hochwasserfrühwarnung nur eine verlässlich vorherzusagende Zeitspanne von wenigen Stunden; die Unsicherheiten steigen dabei mit zunehmender Vorhersageweite und/oder abnehmender Größe des betrachteten Vorhersagegebiets.

Neben der Erstellung von Warnprodukten, müssen für eine effektive, verlässliche und adressatengerechte Hochwasserfrühwarnung auch die Verteilung von Warnungen, die Risikokommunikation sowie die Informations- und Verhaltensvorsorge einen Platz in einem umfassenden Hochwasserrisikomanagement finden. Die Verarbeitung und vor allem Kommunikation von Vorhersageunsicherheiten stellen dabei nach wie vor große Herausforderungen im Hochwasserrisikomanagement dar. Mehr und mehr setzen sich Techniken zur probabilistischen Vorhersage durch. Weitgehend ungeklärt ist bisher, wie und mit welchen Konsequenzen für das Risikomanagement solche Aussagen kommuniziert werden.

Die hydrologische Modellierung als Basis einer Frühwarnung muss den Problemen der Vorhersage für unbe-

obachtete Einzugsgebiete in geeigneter Weise begegnen. Eine weitere Herausforderung ist die Ableitung von flächigen Warninformationen aus lokal gültigen Modellaussagen. Zukünftig werden probabilistische Vorhersagen an Bedeutung gewinnen müssen, da sich die Vorhersagbarkeit von kleinräumigen Starkregen nicht mehr wesentlich verbessern lassen wird.

Abschließend sei bemerkt, dass es nach dem aktuell anerkannten Stand von Wissenschaft und Technik prinzipiell möglich ist, eine nützliche Hochwasserfrühwarnung für kleine, schnell reagierende Einzugsgebiete zu erstellen. Problematisch ist, dass die potentiell schadensträchtigsten Ereignisse naturgemäß sehr selten und damit sehr schwer bis kaum vorhersagbar sind.

<sup>1</sup>Streng genommen gilt dies nur, wenn eine Frühwarnung möglichst präzise ist; Fehl- bzw. Falschinformationen – welche aufgrund von Unsicherheiten nicht auszuschließen sind – können hingegen das Gegenteil bewirken!

## **Teil II**

# **Pilotstudien: Möglichkeiten und Grenzen bei der Hochwasserfrühwarnung im Lichte operationeller Anforderungen**

## 5 Erhebung von Ansprüchen und Erwartungen potentieller Nutzer eines Hochwasserfrühwarnsystems in Sachsen

Im Freistaat Sachsen gibt es Bestrebungen, eine Frühwarnung vor Hochwasser in kleinen, schnell reagierenden Einzugsgebieten bereitzustellen. Für die Erstellung und Verteilung dafür notwendiger Produkte zeichnet das Landeshochwasserzentrum Sachsen verantwortlich. Zur Ermittlung der Ansprüche potentieller Nutzer von Hochwasserfrühwarnungen wurde eine quantitative Erhebung auf Basis einer Online-Befragung konzipiert, durchgeführt und deren Ergebnisse statistisch ausgewertet.

Von 491 Befragten beantworteten bemerkenswerte 69 % den Fragebogen vollständig, weitere 7 % unvollständig. Circa 19% riefen den Fragebogen trotz Einladung nicht auf und rund 5% konnten beispielsweise aufgrund falscher Emailadressen nicht zur Befragung eingeladen werden. Die Erhebung lieferte ein recht homogenes Bild, unabhängig von den befragten Nutzergruppen.

Für alle potentiellen Nutzer ist erkennbar, dass die mindestens benötigte Vorwarnzeit, um geeignete Maßnahmen zu ergreifen, auf einen Tag oder kürzer eingeschätzt wird. Weiterhin wird einer kürzeren, dafür genaueren Warnung gegenüber einer langfristigen und stärker mit Unsicherheiten behafteten Abschätzung der Vorzug gewährt. Generell wünschen sich potentiell von Hochwasser Betroffene selektive, ereignisbezogene Informationen beziehungsweise informieren sich eher ereignisbezogen (und nicht auf regelmäßiger Basis).

Die in diesem Kapitel vorgestellte Erhebung (fragebogenbasierte Nutzerbefragung) dient der Klärung der Ansprüche zukünftiger Nutzer von Hochwasserfrühwarnprodukten für kleine Einzugsgebiete. Bezogen auf den Meilensteinplan des Gesamtprojekts (Tabelle 3.4.2) handelt es sich dabei um Meilenstein Nummer 1. Die Ergebnisse der Erhebung sind wichtig, um Produkte zur Hochwasserfrühwarnung bzw. ein geeignetes methodisches Vorgehen zu ihrer Erstellung zu konzipieren.

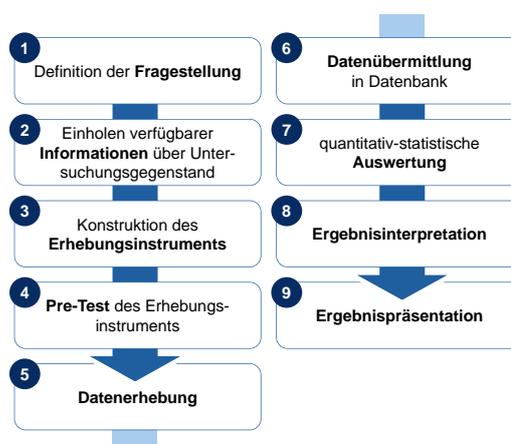


Abbildung 5.1.1: Schritte der durchgeführten quantitativen Erhebung.

### 5.1 Material und Methoden

Für die Durchführung einer Erhebung hält die empirische Sozialforschung das nötige Instrumentarium bereit (BIRKMANN ET AL., 2011; SCHNELL ET AL., 2013). Erhebungen sind beispielsweise gebräuchlich um sich – wie im vorliegenden Falle – seitens des Bereitstellers von umweltrelevanten Vorhersagen ein Bild über die Nachfrage verschiedener Vorhersageprodukte durch die Nutzer sowie die Qualität der Übermittlung bzw. Kommunikation dieser Produkte zu verschaffen. Es existiert eine Vielzahl von Arbeiten, die sich solchen Fragestellungen mit empirischen Methoden annehmen, darunter SIEGRIST & CVETKOVICH (2000); BRILLY & POLIC (2005); GIGERENZER ET AL. (2005); SIEGRIST ET AL. (2006); MORSS ET AL. (2008); FRICK & HEGG (2011); TERPSTRA (2011) und WETTERHALL ET AL. (2013), um nur einige zu nennen.

Generell unterscheidet man quantitative (z. B. mittels Fragebogen) und qualitative Erhebungsmethoden (z. B. mittels Interview). Quantitative Verfahren zeichnen sich durch eine standardisierte Form der Befragung und Beobachtung aus. Damit eignen sie sich gut zur objektiven Messung und Bewertung von Hypothesen, auch und vor allem gegenüber großen Stichproben. Es kommen dabei häufig Messinstrumente wie Fragebögen oder Inventare zum Einsatz (SCHNELL ET AL., 2013).

Für die hier vorgestellte Untersuchung kamen quantitative Erhebungsmethoden – konkret ein Fragebogen – zum Einsatz. Die Hauptgründe für die Wahl quantitativer Methoden waren die Verfügbarkeit einer verhältnismäßig großen Stichprobe, die zu erwartende Objektivität und Vergleichbarkeit der Ergebnisse, als auch im Vergleich zu qualitativen Verfahren geringere Kosten und Zeitaufwand. Dennoch bergen quantitative Methoden Nachteile, die bei der Interpretation und Einordnung der Ergebnisse nicht außer Acht gelassen werden dürfen. Für die Befragung kam eine typische Abfolge von Arbeitsschritten zur Anwendung (siehe Abb. 5.1.1).

### 5.1.1 Aufbau des Fragebogens

Als Erhebungsinstrument wurde ein Online-Fragebogen entwickelt. Eine Befragung mit auf dem Postwege zugestellten Fragebögen wurde nicht in Erwägung gezogen, da die verhältnismäßig große Anzahl der Befragungssubjekte eine automatisierte Auswertung der Fragebögen erfordert hätte. Zur Erstellung des Fragebogens, der Information der Befragten sowie der Sammlung der Befragungsergebnisse wurde die Software SoSci Survey (LEINER, 2013) verwendet, deren Nutzung für Behörden kostenfrei ist. Der Fragebogen umfasste 15 Einzelfragen, davon 12 Multiple-Choice-Fragen (nominale Merkmale), zwei Fragen zur Abgabe einer graduellen Einschätzung (ordinale Merkmale) sowie eine Frage zur Übermittlung verbaler Kommentare. Streng genommen handelte es sich also um eine quantitative Erhebung von Merkmalen, welche mit qualitativen Elementen (Ergänzungsmöglichkeiten, verbale Kommentare) angereichert wurde.

Tabelle 5.1.1 gibt eine Übersicht der im Bogen gestellten Fragen. Im Rahmen eines „Pre-Tests“ des Fragebogens (vergleiche Punkt 4 in Abb. 5.1.1) wurden Verbesserungsvorschläge eines engen Personenkreises mit fachlich-administrativem Hintergrund berücksichtigt. Ein Kriterium bei der Erstellung des Fragebogens war, dass die Durchfüh-

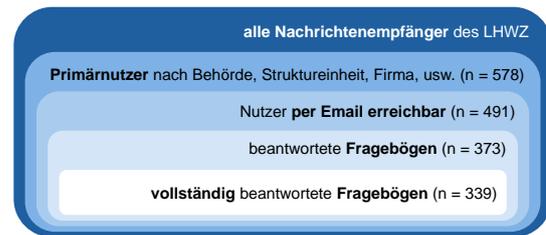


Abbildung 5.1.2: Zur Einordnung der befragten Nutzerstichprobe.

rungsdauer lediglich fünf bis zehn Minuten betragen sollte.<sup>1</sup> Die Nutzer wurden per Email zur Befragung eingeladen, wobei SoSci Survey die Möglichkeit des Emailversands bereithielt. Die erste Einladung erfolgte am 10.01.2014, Erinnerungen wurden am 24.01.2014 sowie am 07.02.2014 verschickt. Der Fragebogen war bis zum 28.02.2014 (also 50 Tage) erreichbar. Die gegebenen Antworten wurden variablenbasiert erfasst und in einer Datenbank abgelegt, wo die Daten für sich anschließende quantitative Auswertungen zugänglich waren.

### 5.1.2 Zusammensetzung der Stichprobe

Als Befragungssubjekte wurden im Sinne einer systematischen Stichprobe<sup>2</sup> (COCHRAN, 1977) jene 491 von allen 578 entsprechend der Sächsischen Hochwassermeldeordnung (HWMO, 2015) registrierten<sup>3</sup> behördlichen und privaten Nutzern des LHWZ Sachsen ausgewählt, welche eine Emailadresse hinterlegt hatten. Das entspricht einem Anteil von 85%. An dieser Stelle muss darauf hingewiesen werden, dass es sich bei den Befragten im Sinne der Hochwasserrisikoforschung überwiegend nicht grundsätz-

<sup>1</sup> Die Literatur (z. B. ARMSTRONG & OVERTON, 1977) legt nahe, dass langwierige Befragungen die Rücklaufquote mindern können.

<sup>2</sup> Das heißt, nicht im Sinne einer Zufallsstichprobe.

<sup>3</sup> Die tatsächliche Anzahl der Nachrichtempfänger ist höher. Die Nutzerdaten wurden dahingehend bereinigt, dass pro empfangender Behörde, Struktureinheit, Firma usw. lediglich der primäre Nachrichtempfänger verwendet wurde. Auch wird nur dieser in der Erhebung befragt.

**Tabelle 5.1.1:** Übersicht der im Fragebogen gestellten Fragen. Für die Antwortmöglichkeiten und Auswertung der gegebenen Antworten siehe Abschnitt 5.2.1.

Nr.	Frage	Typ	Zus. offene Antwortmöglichkeit
1	Welcher Nutzergruppe gehören Sie an?	MC	ja
2 <sup>§</sup>	Für welche(s) Gewässer/Pegel wäre eine Frühwarnung für Sie von Interesse? (FG Weiße Elster)	MC	ja
3 <sup>§</sup>	Für welche(s) Gewässer/Pegel wäre eine Frühwarnung für Sie von Interesse? (FG Mulde)	MC	ja
4 <sup>§</sup>	Für welche(s) Gewässer/Pegel wäre eine Frühwarnung für Sie von Interesse? (FG Elbe)	MC	ja
5 <sup>§</sup>	Für welche(s) Gewässer/Pegel wäre eine Frühwarnung für Sie von Interesse? (FG Schwarze Elster)	MC	ja
6 <sup>§</sup>	Für welche(s) Gewässer/Pegel wäre eine Frühwarnung für Sie von Interesse? (FG Spree und Lausitzer Neiße)	MC	ja
7	Sind Sie an einer ständig verfügbaren Abschätzung der zukünftigen Entwicklung des Abflussgeschehens interessiert?	MC	nein
8	Eine Vorhersage ist umso <i>ungenauer</i> , je weiter sie in die Zukunft reicht. Wie sollte ihrer Meinung nach eine an Sie weitergegebene Vorhersage sein?	MC	nein
9	Welchen Zeitraum muss eine Vorhersage <i>mindestens</i> abdecken, um für Ihre Zwecke überhaupt dienlich sein zu können?	MC	ja
10 <sup>§</sup>	Welche der folgenden Darstellungen würden Sie zu Ihrer Information bevorzugen?	MC	ja
11 <sup>§</sup>	Welchen der angeführten Punkte würden Sie zustimmen? (Charakteristik der Warnung)	MC	nein
12 <sup>§</sup>	Welchen der angeführten Punkte würden Sie zustimmen? (Informationswege)	MC	nein
13	Wie zufrieden sind Sie insgesamt mit den durch das Landeshochwasserzentrum übermittelten oder bereitgestellten Informationen?	GR	nein
14	Wie würden Sie abschließend die Arbeit des Landeshochwasserzentrums insgesamt bewerten?	GR	nein
15*	Haben Sie sonstige Anmerkungen oder Wünsche, die Sie uns mitteilen möchten?	VB	ja

MC: Multiple Choice; GR: graduelle Antwortmöglichkeit (in fünf Abstufungen von „nicht zufrieden“ bzw. „schlecht“ bis „sehr zufrieden“ bzw. „hervorragend“); VB: verbale Antwortmöglichkeit; FG: Flussgebiet; <sup>§</sup>Mehrfachnennungen zulässig; \*Beantwortung nicht relevant für Status „Fragebogen vollständig beantwortet“ bzw. „unvollständig beantwortet“.

lich um Laien handelt;<sup>1</sup> die registrierten Nutzer nehmen am regelmäßigen Hochwassernachrichtendienst teil, fungieren als Multiplikatoren im Falle der Hochwasserabwehr und durch Meldeübungen wird eine hohe Erreichbarkeit gewährleistet.

Abbildung 5.1.2 spiegelt die für die Erhebung befragte Stichprobe und den Anteil der zurück erhaltenen beant-

worteten Fragebögen wider (siehe Abschnitt 5.2). Mit einer Befragungsquote von 85 % ist die gewonnene Stichprobe für die Grundgesamtheit vermutlich als repräsentativ anzusehen, was noch zu überprüfen sein wird.

Tabelle 5.1.2 gibt eine Übersicht zur institutionellen Zusammensetzung der befragten Nutzer. Bezogen auf die einzelnen angesprochenen Nutzergruppen wiesen die Nutzer der Kommunalverwaltung und der privaten Wirtschaft die meisten Befragungssubjekte auf. Als Konsequenz der Verwaltungsgliederung in Sachsen ergaben sich für Nutzer auf Kreis- und Landesebene (Landratsämter, Landesdirektion) sowie bei Feuer-/Wasserwehren und dem Katastrophenschutz (Leitstellen) vergleichsweise weniger Befragungssubjekte. Daher schien eine nutzergruppenspezifische Auswertung der Ergebnisse sinnvoll.

<sup>1</sup> Es gibt viele Belege dafür, dass sich Risikowahrnehmung und – dadurch beeinflusst – ergriffene (Gegen-)Maßnahmen von Laien und Experten stark unterscheiden können (siehe z. B. GREEN ET AL., 1991; McANDREW, 1993). So neigen Laien dazu, den stochastischen Charakter von Hochwasserereignissen zu ignorieren und das *Auftreten* von katastrophalen Hochwassern „Fehlern“ beim Hochwasserschutz und bei der Hochwasserabwehr zuzurechnen. Diese kausalistische Sicht wiederum kann Zorn, Wut und Ablehnung auslösen und das Vertrauen in amtliche Vorhersagen gar schmälern (BRILLY & POLIC, 2005), was für potentiell Betroffene dann objektiv nachteilig ist.

**Tabelle 5.1.2:** Übersicht über die Häufigkeit der Befragungssubjekte nach Nutzergruppen.

Nutzergruppen	Anzahl	Anteil
Kommunalverwaltung, Bürgermeister	356	73 %
Verwaltung/Behörde auf Kreisebene	10	2 %
Staatliche Verwaltung/Landesbehörde	5	1 %
Feuer-/Wasserwehr, Katastrophenschutz (Leitstellen)	14	3 %
Private Wirtschaft und Unternehmen	90	18 %
Privatpersonen	16	3 %
Gesamt	491	100 %

### 5.1.3 Repräsentativität der Stichprobe, Antwortausfall- und Schweigeverzerrung

Die quantitativ-statistische Auswertung stützte sich auf Methoden der deskriptiven Statistik (Häufigkeits- und Subgruppenanalysen), was die Grundlage für weitere Interpretationen bildete. Dabei war zunächst zu überprüfen, ob die erhobenen Daten dahingehend belastbar sind, dass die Repräsentativität der Stichprobe der Befragten gegeben ist (vergleiche Abb. 5.1.2). In der empirischen Sozialforschung ist der Begriff „Repräsentativität“ nicht eindeutig definiert. Meist wird darunter aber verstanden, dass die *Verteilung* interessierender Merkmale einer Stichprobe der der Grundgesamtheit ähnelt (VON DER LIPPE & KLADOBRA, 2002; FRICK ET AL., 2004). Dieser Vorstellung soll hier gefolgt werden.

Grundlage für den Test auf Repräsentativität der herangezogenen Stichprobe bildeten Daten des internen Nutzerverzeichnisses des LHWZ. Die Repräsentativität der Stichprobe jener Nutzer, welche per Email erreichbar waren, für die Grundgesamtheit aller Primärnutzer wurde durch Überprüfung der Hypothese getestet, dass die empirische Häufigkeitsverteilung der Stichprobe jener der Grundgesamtheit folgt. Dazu bietet sich ein verteilungsunabhängiger, nichtparametrischer Hypothesentest an. Es wurde der Kolmogoroff-Smirnoff-Anpassungstest verwendet, welcher diese Anforderungen erfüllt und eine Annahme der Ausgangshypothese ergab.

Da zwar die herangezogene Stichprobe repräsentativ war, die nutzergruppenspezifischen Rücklaufquoten aber kleiner als 100 % waren, stellte sich die Frage, ob die Meinung der Befragungsteilnehmer sich von der Meinung derer unterscheidet, welche an der Befragung nicht teilgenommen haben. Es gibt in der Empirie eine Vielzahl von Möglichkeiten mit den vorgenannten Untergruppen der

Nicht-Teilnehmer<sup>1</sup> zu verfahren (siehe z. B. ARMSTRONG & OVERTON, 1977; GROVES, 2009; SCHNELL ET AL., 2013).

Ein statistisch valider Test auf eine Antwortausfallverzerrung ist überhaupt nur möglich, wenn man zumindest einige Variablen von Antwortenden und Verweigerern gleichermaßen kennt (z. B. das Alter) und anhand derer die Ähnlichkeit beider Gruppen vergleicht. Das war im vorliegenden Fall nicht gegeben. Es wurde stattdessen versucht, durch gezielte, stichprobenartige telefonische Befragung der Verweigerer den Grund für die Verweigerung zu finden.

### 5.1.4 Häufigkeitsauswertung; Zusammenhänge zwischen Variablen

Zur Analyse der Befragungsergebnisse der wichtigsten Fragen der Erhebung kamen Häufigkeitsbetrachtungen und Subgruppenanalysen mittels Kontingenztabellen zur Anwendung (BIRKMANN ET AL., 2011; SCHNELL ET AL., 2013). Dabei wurden gegebene Antworten nutzergruppenspezifisch aufgeschlüsselt, indem die Antworten auf Frage 1 (Frage nach den Nutzergruppen) mit den Antworten auf die weiteren Fragen kreuzweise verschnitten wurden (siehe als Beispiel Tabelle 5.1.3). Es wird also mehr als eine Variable gleichzeitig betrachtet; es handelt sich daher um eine multivariate Betrachtungsweise.

Eine wichtige Fragestellung ist, ob es einen statistischen Zusammenhang zwischen den untersuchten Variablen gibt, z. B. zwischen den Variablen „Nutzergruppe“ und „bevorzugtes Frühwarnprodukt“. Oder in anderen Worten: antworteten bestimmte Nutzergruppen anders, als andere? Solch ein Effekt kann beispielsweise durch stark unterschiedlich mächtige Teilstichproben – wie im vorliegenden

<sup>1</sup> Hier sind alle Befragungssubjekte gemeint, welche keinen vollständig ausgefüllten Fragebogen zurückgesendet haben, also beispielsweise auch jene, welche aufgrund einer unzustellbaren Einladung gar keinen Zugang zur Umfrage hatten.

**Tabelle 5.1.3:** Beispiel einer Kontingenztabelle zwischen den Antworten auf Frage 1 (Nutzergruppe) und Frage 9: „Welchen Zeitraum muss eine Vorhersage mindestens abdecken, um für Ihre Zwecke überhaupt dienlich sein zu können?“

Nutzergruppe/Antwort		≤ 3 h	6 h	12 h	24 h	≥ 72 h	Weiß nicht	Summe
Kommunalverwaltung, Bürgermeister	Anzahl:	20	45	50	100	36	10	261
	Anteil:	7,7 %	17,2 %	19,2 %	38,3 %	13,8 %	3,8 %	100 %
Verwaltung/Behörde auf Kreisebene	Anzahl:	0	3	1	3	3	0	10
	Anteil:	0 %	30,0 %	10,0 %	30,0 %	30,0 %	0 %	100 %
Staatliche Verwaltung/Landesbehörde	Anzahl:	1	1	0	1	1	0	4
	Anteil:	25,0 %	25,0 %	0 %	25,0 %	25,0 %	0 %	100 %
Feuer-/Wasserwehr, Kat.-Schutz	Anzahl:	0	1	3	3	1	0	8
	Anteil:	0 %	12,5 %	37,5 %	37,5 %	12,5 %	0 %	100 %
Private Wirtschaft und Unternehmen	Anzahl:	5	11	11	11	8	0	46
	Anteil:	10,9 %	23,9 %	23,9 %	23,9 %	17,4 %	0 %	100 %
Privatpersonen	Anzahl:	2	2	2	2	2	0	10
	Anteil:	20,0 %	20,0 %	20,0 %	20,0 %	20,0 %	0 %	100 %
Gesamt	Anzahl:	28	63	67	120	51	10	339
	Anteil:	8,3 %	18,6 %	19,8 %	35,4 %	15,0 %	2,9 %	100 %

Fälle – hervorgerufen sein, oder aber seine Ursache in einem tatsächlich abweichenden Antwortverhalten haben. Häufig wird in diesem Zusammenhang Cramérs-V bewertet, ein  $\chi^2$ -basiertes Assoziationsmaß. In der Literatur (z. B. SACHS, 1999; BACKHAUS ET AL., 2008) findet man meist die Angabe, dass ein Cramérs-Wert  $V \geq 0,25$  auf eine Abhängigkeit hindeutet.

Neben einem Assoziationsmaß wird weiterhin oft der  $p$ -Wert angegeben, welcher die Irrtumswahrscheinlichkeit bzw. die Signifikanz eines Hypothesentests ( $H_0$ : „Es besteht kein Zusammenhang...“) darstellt. Dabei kommt bei multivariaten Daten oft der  $\chi^2$ -Test zum Einsatz. Bei Werten  $p \leq 0,001$  geht man von einem höchst signifikanten Zusammenhang aus, abgestuft abnehmend über  $p \leq 0,01$  (sehr signifikant),  $p \leq 0,05$  (signifikant), bis hin zu Werten  $p > 0,05$  (nicht signifikant).

**Schlussfolgerung 20:** Eine Befragung ist ein geeignetes Instrument, um Ansprüche und Erwartungen von Nutzern von Frühwarnprodukten zu erheben. Nach Einführung neuer Produkte bzw. Anpassungen sollte ein Follow-Up der Erhebung durchgeführt werden. Eine Information der Nutzer über Entwicklungs-/Verbesserungsprozesse eines Frühwarnsystems begleitend zu einer Befragung ist ein Element einer partizipativen Verhaltensvorsorge. ❖

## 5.2 Ergebnisse

Im Rahmen der Erhebung beantworteten von 491 Befragten bemerkenswerte 69 % ( $n = 339$ ) den Fragebogen vollständig, weitere 7 % ( $n = 34$ ) unvollständig. Circa 19 % ( $n = 93$ ) riefen den Fragebogen trotz Einladung nicht auf und rund 5 % ( $n = 25$ ) konnten beispielsweise aufgrund ungültiger Emailadressen nicht zur Befragung eingeladen werden.

Schlüsselt man die Rücklaufquoten nach Nutzergruppen auf (siehe Abb. 5.2.1), zeigen sich Unterschiede. So betrug die Rücklaufquote für die Nutzergruppe „Verwaltung/Behörde auf Kreisebene“ 100 %, gefolgt von der Gruppe „staatliche Verwaltung/Landesbehörde“ (80 %), „Feuerwehr und Katastrophenschutz“ (71 %), „Kommunalverwaltung“ (70 %), während für die Gruppen „private Wirtschaft und Unternehmen“ (63 %) sowie „Privatpersonen“ (56 %) relativ die geringsten Rückläufe zu verzeichnen waren. Dennoch sind derlei Rücklaufquoten für eine quantitative Erhebung auf Basis eines Online-Fragebogens als ausgesprochen hoch einzustufen (SCHNELL ET AL., 2013), was im Wesentlichen aus der Wahl einer systematischen Stichprobe herrührt (vergleiche Abschnitt 5.1.2).

Der fragenspezifische Antwortausfall von Frage zu Frage war veränderlich, wobei es keine Frage gab, die von allen 373 Befragungssubjekten gleichsam beantwortet wurde. Fragen, welche von annähernd allen Teilnehmern beantwortet wurden, sind die Fragen 2 bis 6 (Interesse für bestimmtes Flussgebiet bzw. Pegel) sowie die Fragen

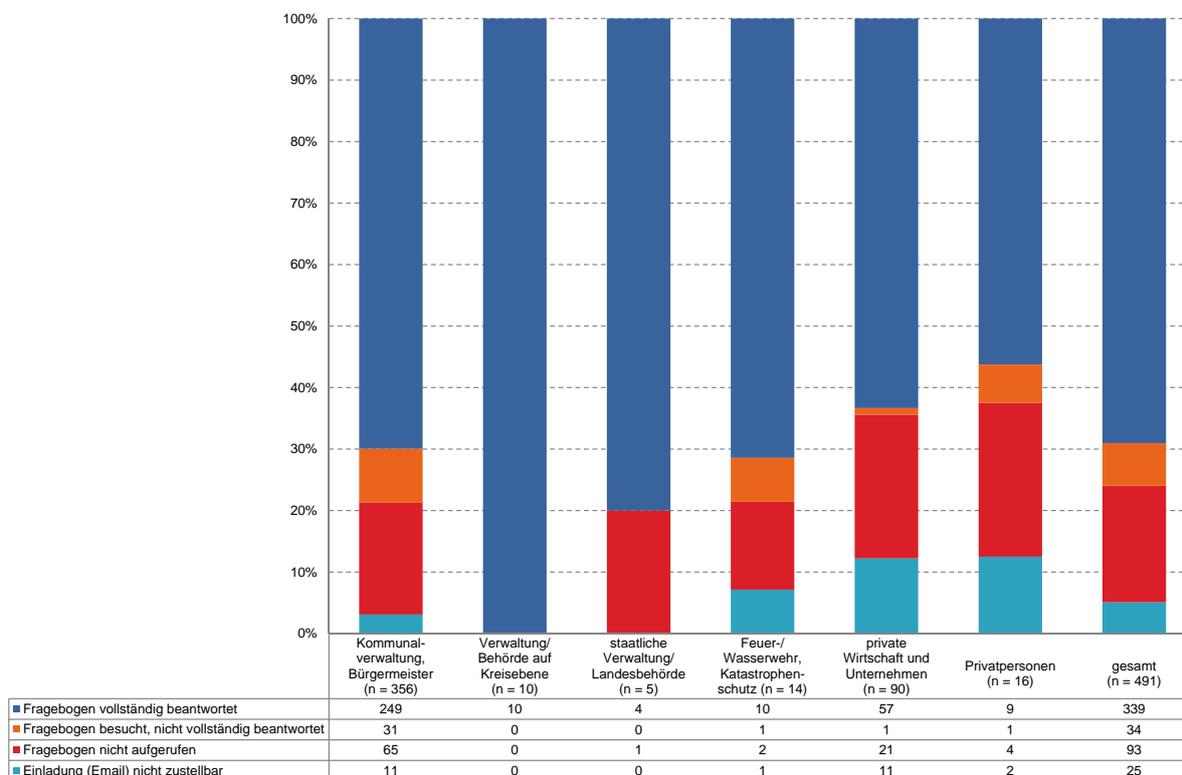


Abbildung 5.2.1: Nutzergruppenspezifische Darstellung der Rücklaufquoten bei der Befragung.

10, 11 und 12 (Darstellungsform und Zustimmungspunkte). Generell war die fragenspezifische Antwortquote sehr hoch (zwischen 88 % und 99 %) und etwa 25 % der Befragten hinterließ im Rahmen von Frage 15 schriftliche Kommentare (siehe Abschnitt 5.2.4).

Eine Untersuchung der Antwortausfälle durch telefonische Rückfragen (siehe Abschnitt 5.1.3) zeigte, dass die Verweigerung – bis auf einen bekannten Fall<sup>1</sup> – nicht intentional durch die Befragungssubjekte herbeigeführt wurde. Für ein unvollständiges Beantworten des Fragebogens wurden mehrheitlich Gründe genannt wie Zeitmangel, technische Probleme, oder es wurde schlichtweg die Beantwortung einiger Fragen vergessen. Die vorgenannten Befunde lassen – auch im Lichte der ungewöhnlich hohen Ausschöpfungsquote der Befragung – die Hypothese gerechtfertigt erscheinen, dass bei der durchgeführten Befragung keine Antwortausfall- bzw. Schweigeverzerrung vorhanden ist.

Im Folgenden sollen die wichtigsten Ergebnisse dargestellt werden. Ein besonderer Fokus soll dabei auf die

durch die Nutzer gewünschte Vorwarnzeit gelegt werden; wie eingangs ausgeführt, ein wichtiges Kriterium bei der Wahl eines geeigneten methodischen Vorgehens zur Erstellung von Produkten zur Hochwasserfrühwarnung. Die erhobenen Daten sollen relativ dargestellt werden. Mögliche problematische Effekte unterschiedlich umfangreicher Teilstichproben (z. B. zwischen den Nutzergruppen „Kommunalverwaltung, Bürgermeister“ sowie „Verwaltung/Behörde auf Kreisebene“) werden in Abschnitt 5.2.2 besprochen.

### 5.2.1 Häufigkeitsbetrachtungen der wichtigsten Befragungsergebnisse nach Nutzergruppen

Die beschriebene multivariate, kreuzweise Häufigkeitsauswertung der Befragungsergebnisse wurde zwischen der Frage 1 (Nutzergruppe) und den Fragen 7 bis 14 durchgeführt. Auf die Frage 15 wurden qualitative (verbale) Antworten gegeben. Damit ist eine häufigkeitsbezogene Auswertung für diese Fragen nicht angezeigt. Eine Besprechung der auf Frage 15 gegebene Antworten findet sich im Abschnitt 5.2.4. Durch die vielfältigen Antwortmöglichkeiten

<sup>1</sup> In diesem Fall lag eine aktive Verweigerung der Teilnahme vor, da Methodik („Repräsentativität“) und Nutzen der Befragung („Es wird sich dadurch nichts ändern“) grundsätzlich in Frage gestellt wurden.

auf die Fragen nach den interessierenden Pegeln, Gewässern oder Flussgebieten (Fragen 2 bis 6) wurden diese Befragungsergebnisse ebenfalls keiner Häufigkeitsbetrachtung unterzogen. Allerdings erfolgt eine Betrachtung der räumlichen Herkunft bestimmter Antworten auf die Fragen 2 bis 6 im Abschnitt 5.2.3.

Die Ergebnisse der multivariaten Analyse sind in Form von Histogrammen in den Abbildungen 5.2.4 und 5.2.5 zusammengestellt. Grundsätzlich ergeben sich pro Nutzergruppe bei Fragen mit einfacher Antwortmöglichkeit (Fragen 7 bis 9 sowie 13 und 14) als Summe der Anteile je Antwortmöglichkeit (Balken) jeweils 100 %. Diese 100 % entsprechen wiederum der Gesamtanzahl der pro Frage und Nutzergruppe zurückerhaltenen Antworten. Bestand bei Fragen die Möglichkeit zu Mehrfachantworten (Fragen 10 bis 12), kann die Summe der Anteile je Antwortmöglichkeit jenseits der 100 % liegen. Zusätzlich dargestellt – als jeweils letzte Balkengruppe – ist die Verteilung *aller* zurückerhaltenen Antworten, welche naturgemäß Ähnlichkeit zu der der stärksten Nutzergruppe „Kommunalverwaltung, Bürgermeister“ aufweist.

Die beobachteten Anwohnhäufigkeiten waren in ihrer relativen Verteilung zwischen den Nutzergruppen meist recht ähnlich. Beispielsweise war oft die häufigste Antwort (der Modalwert der Verteilung) über alle Nutzergruppen gleich. Allerdings gibt es auch optisch wahrnehmbare Unterschiede in den Histogrammen, am augenscheinlichsten bei den Fragen 9 sowie 12 bis 14. Da die Nutzergruppen aber unterschiedlich stark besetzt waren, ist zu klären, ob die visuellen Unterscheide auf statistischen Unterschieden gründen (siehe dazu Abschnitt 5.2.2).

Auf eine detaillierte Einzelbeschreibung der Befragungsergebnisse wird an dieser Stelle verzichtet und stattdessen auf die Aussagekraft der Abbildungen 5.2.4 und 5.2.5 verwiesen. Eine Zusammenfassung der relevanten Kernaussagen der Befragung sowie eine Diskussion der Ergebnisse finden sich in den Abschnitten 5.3 bzw. 5.4.

### 5.2.2 Stärke der Abhängigkeit gemachter Angaben von der Nutzergruppe

Die Frage nach dem nutzergruppenspezifischen Antwortverhalten soll gemäß Abschnitt 5.1.4 mit Hilfe des Assoziationsmaßes Cramérs- $V$  beantwortet werden. Ta-

belle 5.2.1 zeigt die Cramérs- $V$  und  $p$ -Werte<sup>1</sup> für die quantitativ-statistisch ausgewerteten Befragungsergebnisse. Bei Fragen mit der Möglichkeit mehrerer Antworten wurde Cramérs- $V$  und  $p$ -Wert für jede einzelne Antwortmöglichkeit bestimmt. Grundsätzlich bestanden nutzergruppenspezifische Unterschiede im Hinblick auf die Wahrscheinlichkeit für gegebene Antworten bei jeweils einer Antwortmöglichkeit der Fragen 11 sowie 12 (Zustimmungspunkte).

Darüber hinaus antworteten die Befragten verschiedener Nutzergruppen spezifisch auf die Fragen 13 und 14 (Zufriedenheit mit Vorhersage-Produkten, generelle Zufriedenheit mit der Arbeit des LHWZ). Bei den beiden letztgenannten Fragen gaben vor allem die Gruppen „private Wirtschaft und Unternehmen“ sowie „Privatpersonen“ von der restlichen Stichprobe abweichende Einschätzungen ab (siehe Abb. 5.2.5, unten). Bei allen weiteren Fragen waren keine signifikanten Unterschiede in den Antworten der verschiedenen Nutzergruppen feststellbar. Demnach ist der Effekt heterogener Teilstichprobenumfänge als vernachlässigbar einzuschätzen; ein relativer Vergleich der erhobenen Daten ist damit zulässig.

### 5.2.3 Zusammenhang zwischen Einzugsgebiet und gewünschter Vorwarnzeit

Die Frage nach der gewünschten Vorwarnzeit soll zunächst für die Hauptflussgebiete in Sachsen ausgewertet werden. Zwischen den Hauptflussgebieten gab es Unterschiede hinsichtlich der räumlichen Verteilung der am häufigsten genannten gewünschten Vorhersagezeiträume (siehe Abb. 5.2.2). Während sich die Nutzer aus den Gebieten von Elster und Mulden am häufigsten für einen mindestens benötigten Vorhersagezeitraum von einem Tag aussprachen, nannten die Nutzer in den Flussgebieten von Elbe und Nebenflüssen, Schwarzer Elster sowie Spree und Neiße 12 Stunden am häufigsten. Die kumulierten Anteile der Nutzer, welche mit einer Vorwarnzeit von einem Tag (12 h) oder weniger zufrieden sind, betrug für die Weiße Elster 87 % (47 %), Mulden 84 % (52 %), Elbe und Nebenflüsse

<sup>1</sup>Der  $p$ -Wert beruht auf der  $\chi^2$ -Statistik. Ein signifikanter Zusammenhang zwischen Nutzergruppe und Antwortmöglichkeiten bedeutet, dass nicht alle untersuchten Nutzergruppen im statistischen Sinne ähnlich häufig bestimmte Antworten gaben.

**Tabelle 5.2.1:** Assoziations- und Signifikanzmaße zwischen der angegebenen Nutzergruppen (Frage 1) und den wichtigsten Befragungsergebnissen.

Frage	Mehrfachantwortmöglichkeiten	Cramérs- $V$	$\rho$ -Wert	Zusammenhang mit Nutzergruppe
7	–	0,144	0,802	Nicht signifikant
8	–	0,186	0,210	Nicht signifikant
9	–	0,168	0,411	Nicht signifikant
10	Kartenbasierte Darstellung mit Warnklassen auf Kreisebene	0,180	0,283	Nicht signifikant
	Kartenbasierte Darstellung mit Warnklassen für Pegel Einzugsgebiete	0,194	0,180	Nicht signifikant
	Warnmatrix mit Bezug zu einem Meldepegel	0,111	0,901	Nicht signifikant
	Pegelbezogene Ganglinienvorhersage mit Unsicherheitsangabe	0,138	0,705	Nicht signifikant
	Anderer Vorschlag	0,148	0,606	Nicht signifikant
	Weiß nicht	0,131	0,764	Nicht signifikant
	11	Ich hätte Interesse an einer gewässerbezogenen Vorhersage des Abflussgeschehens. Für das mich interessierende Gewässer oder Flussgebiet ist aber keine Vorhersage verfügbar.	0,160	0,484
	Die in den Hochwasserwarnungen enthaltenen Abschätzungen der weiteren Entwicklung der Abflusssituation sind für meine Zwecke nicht ausreichend, da zu ungenau oder zu generell (z. B. für ein zu großes Gebiet).	0,178	0,307	Nicht signifikant
	Die in den Hochwasserwarnungen enthaltenen Abschätzungen der weiteren Entwicklung der Abflusssituation sollten öfter aktualisiert werden, um mein Handeln besser abzusichern.	0,246	0,017	Signifikant
	Die durch das Landeshochwasserzentrum übermittelten und im Internet bereitgestellten Informationen sind zu komplex für meine Zwecke. Ich brauche schnell mehr maßgeschneiderte Informationen.	0,143	0,659	Nicht signifikant
	Ich bin an einer möglichst genauen Vorhersage des zu erwartenden Scheitelwasserstandes (oder -abflusses) interessiert.	0,177	0,659	Nicht signifikant
	Ich bin an einer möglichst genauen Vorhersage des Zeitpunktes des Scheiteleintritts interessiert.	0,125	0,819	Nicht signifikant
12	Ich informiere mich vor allem anhand der mir nachrichtlich übermittelten Informationen (z. B. Hochwasserwarnungen per Fax oder Email).	0,266	0,005	Sehr signifikant
	Ich informiere mich vor allem selbständig über das Internet.	0,201	0,144	Nicht signifikant
	Ich informiere mich vor allem selbständig über Videotext.	0,139	0,697	Nicht signifikant
	Ich informiere mich vor allem selbständig per Telefon (Messwertansager, Anrufbeantworter, Meldedienst).	0,220	0,065	Nicht signifikant
	Ich würde eine Informationsmöglichkeit per Mobile App (Smartphone) begrüßen.	0,186	0,238	Nicht signifikant
13	–	0,446	0,003	Sehr signifikant
14	–	0,429	0,010	Sehr signifikant

82 % (63 %), Schwarzer Elster 78 % (60 %), Spree und Neiße 80 % (64 %) sowie für alle Nutzer 82 % (57 %).<sup>1</sup>

Der Zusammenhang zwischen Einzugsgebietsgröße und gewünschter Vorwarnzeit wurde durch Kombination der Antworten auf Frage 9 (*mindestens* erforderlicher Vor-

hersagezeitraum<sup>2</sup>) und der Einzugsgebietsgröße der in den Fragen 2 bis 6 abgefragten Pegel<sup>3</sup> ermittelt. Es zeigte sich, dass lediglich ein schwacher Zusammenhang bestand (siehe Abb. 5.2.3). Tendenziell wünschen die Nutzer aus kleinen Einzugsgebieten kürzere Vorhersagezeiträume

<sup>1</sup>Diese Zahlen weichen leicht von den lediglich durch Betrachtung der Antworten auf Frage 9 erhaltenen ab (vergleiche Abb. 5.2.4). Der Grund dafür ist, dass die Anzahl der Rückläufe, welche Antworten auf die Fragen 2 bis 6 (Pegel/Flussgebiete) und Antwort 9 enthielten kleiner war, als für die Antworten auf Frage 9 allein.

<sup>2</sup>Der mittlere gewichtete Vorhersagezeitraum wurde durch verhältnismäßige Mittelung der gegebenen klassifizierten Antworten (3 h, 6 h usw.) erhalten.

<sup>3</sup>Als Mehrfach-Antwortmöglichkeiten wurden die über das Internetportal des LHWZ erreichbaren 157 Basispegel angeboten. Davon waren zum Zeitpunkt der Erhebung 105 als Hochwassermeldepegel mit Alarmstufen-Richtwerten belegt.

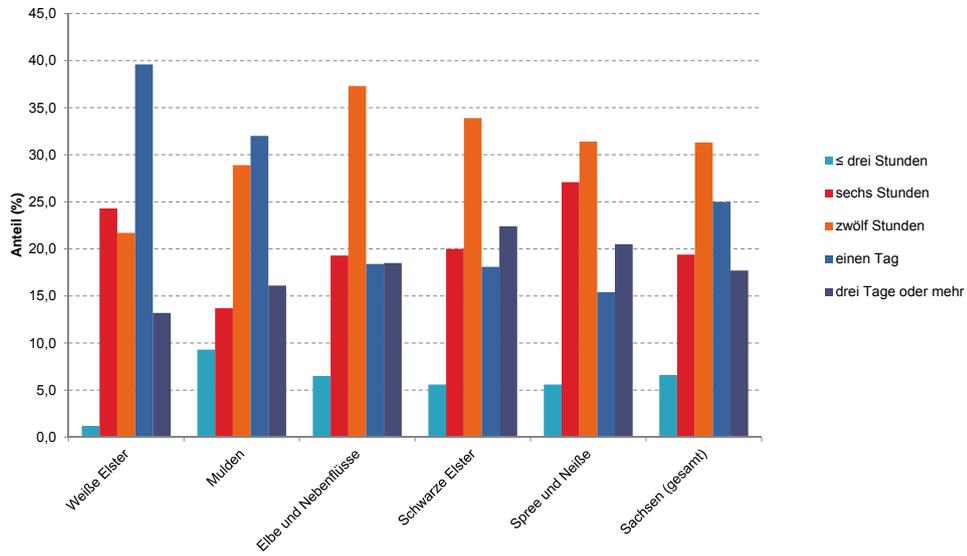


Abbildung 5.2.2: Zusammenhang zwischen mittlerem gewichtetem gewünschtem Vorhersagezeitraum entsprechend Frage 9 und der Herkunft der Antworten nach Hauptflussgebieten.

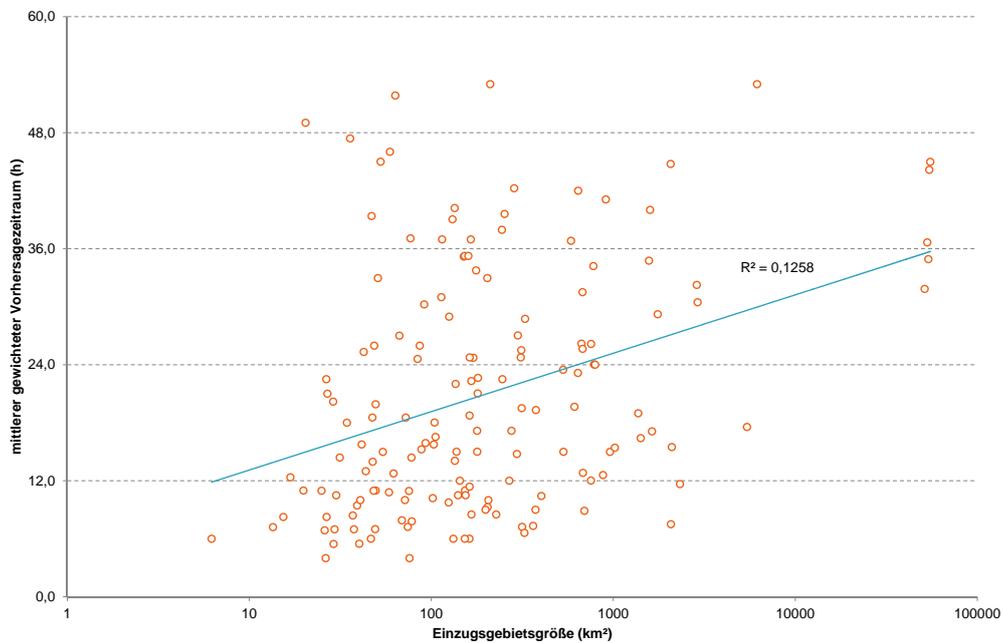


Abbildung 5.2.3: Empirischer Zusammenhang zwischen mittlerem gewichtetem gewünschtem Vorhersagezeitraum entsprechend Frage 9 und der Einzugsgebietsgröße der in den Fragen 2 bis 6 abgefragten Pegel des Basismessnetzes. Das geringe Bestimmtheitsmaß  $R^2 = 0,1258$  lässt keine signifikante Korrelation der Variablen gemäß des zugrunde gelegten log-linearen Regressionsmodells erkennen.

und umgekehrt. Dieser Befund deckt sich durchaus mit den Randbedingungen der fachlichen Machbarkeit, da – wie bereits vielfach ausgeführt – der Vorhersagehorizont für kleine Einzugsgebiete eingeschränkt sein wird. Ein Vorhersagezeitraum  $\leq 12$  h wurde von einer knappen Mehrheit der Nutzer in kleinen Einzugsgebieten (kleiner  $200 \text{ km}^2$ ) als ausreichend angesehen.

Es fällt weiterhin auf, dass einige Nutzer in kleinen Einzugsgebieten (kleiner  $100 \text{ km}^2$ ) unrealistische Erwartungen an darstellbare Vorhersagezeiträume haben. Beispielsweise beantwortete die Mehrheit der Nutzer in den Einzugsgebieten von Jahna und Döllnitz<sup>1</sup> die Frage nach der mindestens erforderlichen Zeit um geeignete Maßnahmen zu ergreifen mit „drei Tagen und mehr“. An dieser Stelle zeigen sich Defizite in der quantitativen Befragungsmethodik, denn möglicherweise wurde die Frage nicht richtig hinsichtlich des Attributs „mindestens“ interpretiert.

Anhand einer Kartendarstellung der räumlichen Verteilung der am häufigsten gegebenen Antwort auf die Frage nach dem gewünschten Vorhersagezeitraum (Abb. 5.2.6) zeigten sich weitere interessante Details. Es wird abermals deutlich, dass der gewünschte Vorhersagezeitraum weitgehend unabhängig von der Einzugsgebietsgröße ist. Vielmehr gibt es regionale Häufungen von großen Werten (z. B. Freiburger Mulde, Jahna, Döllnitz, Spree) bzw. kleinen Werten im Bereich Osterzgebirge, Oberlausitz sowie Neiße. Insbesondere die drei letztgenannten Regionen waren besonders stark von den Hochwasserereignissen der letzten Jahre betroffen. Allerdings ist die These, dass größere Betroffenheit zu besserer Vorsorge und Vorbereitung und damit zu kürzeren benötigten Reaktionszeiten führte auf Basis der im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchung nicht seriös zu belegen.

#### 5.2.4 Auswertung schriftlicher Kommentare

Neben den mittels Multiple Choice und graduellen Antwortmöglichkeiten erhobenen Merkmalen konnten die Befragten auch qualitative Informationen durch die verbale Antwortmöglichkeit bei Frage 15 übermitteln. Die Antworten ließen sich zu bestimmten Problemfeldern kategorisieren. Eine Häufigkeitsauswertung der gegebenen Antworten ist in Tabelle 5.2.2 zu finden.

Der am häufigsten angesprochene Kritikpunkt betraf die derzeit praktizierte Lösung, sog. Hochwassereilbenach-

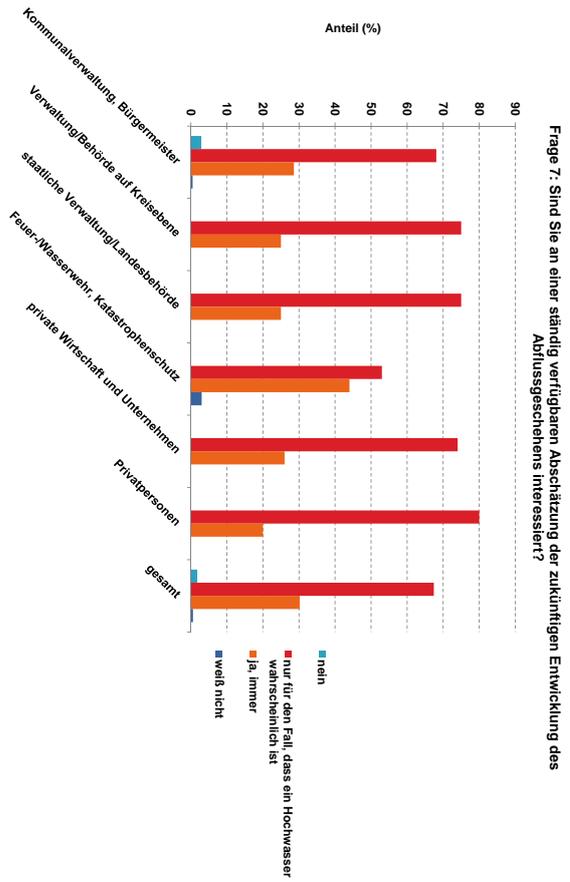
richtigungen per SMS an Einzelnutzer zu verschicken. Diese müssen durch Rücksendung eines übermittelten Codes bestätigt werden. Anderenfalls erfolgt eine „Eskalation“, d. h. eine Information der nächsthöheren Behörde. Die Nutzer wünschten sich an dieser Stelle mehr Praktikabilität beim Bestätigen, in dem Sinne, dass die Bestätigung auch von anderen Geräten oder für eine Gruppe von Empfängern erfolgen kann. Damit in Zusammenhang stand der Wunsch auf Rang 4, die zu alarmierenden Gebiete zu verkleinern; die Nutzer fühlten sich vor allem bereits bei nur lokal bedeutsamen Ereignissen überinformiert, da die Benachrichtigungen zum Zeitpunkt der Erhebung mit Bezug zu dem Hauptflussgebieten verteilt wurden. Die Alarmierung findet seit November 2015 mit Bezug zu verkleinerten „Warngebieten“ statt – die HWMO wurde zwischenzeitlich entsprechend novelliert (HWMO, 2015) – und die technische Bestätigung der Alarmierungen wurde ebenfalls erleichtert.

An zweiter Stelle stand die Forderung nach der Verdichtung des Pegelmessnetzes, vor allem im Oberlauf kleinerer Gewässer. Prinzipiell wünschten sich viele Nutzer hier einen eigenen „Hauspegel“. Generell muss sich aber die Planung und Ertüchtigung des ohnehin dichten Pegelmessnetzes in Sachsen an fachlichen und nicht an empirischen Anforderungen ausrichten.

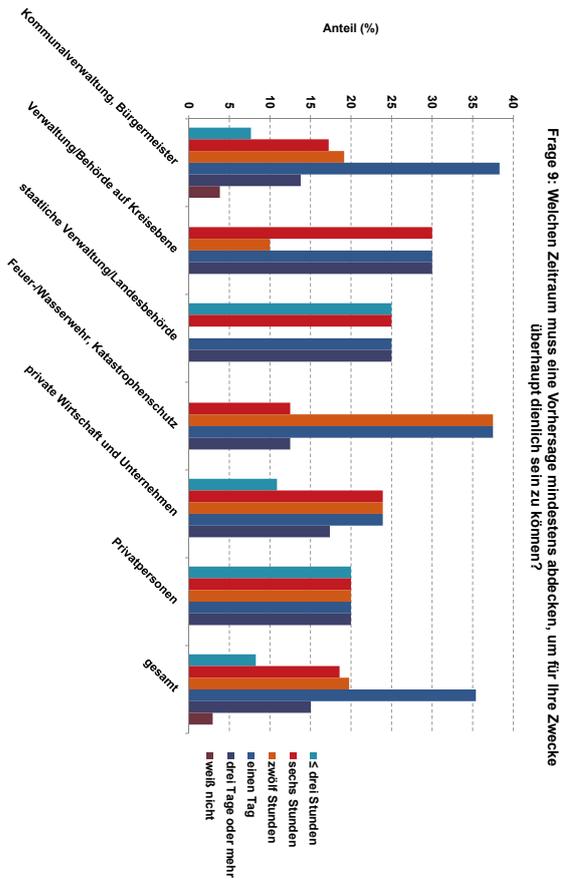
Drittens wurde Kritik an der Breitenverfügbarkeit des LHWZ-Internetportals im Hochwasserfall geübt. Auch diesbezüglich gibt es nunmehr durch eine (auch hardwareseitige) Trennung des Portals in einen Bereich für öffentliche („nicht-registrierte“) und administrativ-institutionelle („registrierte“) Nutzer erhebliche Verbesserungen. Ebenfalls gefordert wurde eine Echtzeit-Darstellung der Daten und eine direkte Einbindung von Daten der Nachbarländer in das LHWZ-Portal. Eine Echtzeitdarstellung ist allerdings nicht möglich, da Daten aufgenommen, gewandelt, übertragen, importiert, geprüft, gespeichert und schließlich veröffentlicht werden müssen. Eine Aktualität von 15 bis 30 Minuten – wie durch das LHWZ gewährleistet – ist daher als praktikabel einzustufen. Bezüglich der Einbindung von Informationen der Nachbarländer muss bemerkt werden, dass diese Informationen sehr leicht und intuitiv über eine Kartendarstellung im LHWZ-Portal zugänglich gemacht sind.

Weitere Anmerkungen beinhalteten Lob für die Arbeit des LHWZ, technische Anpassungswünsche der Informa-

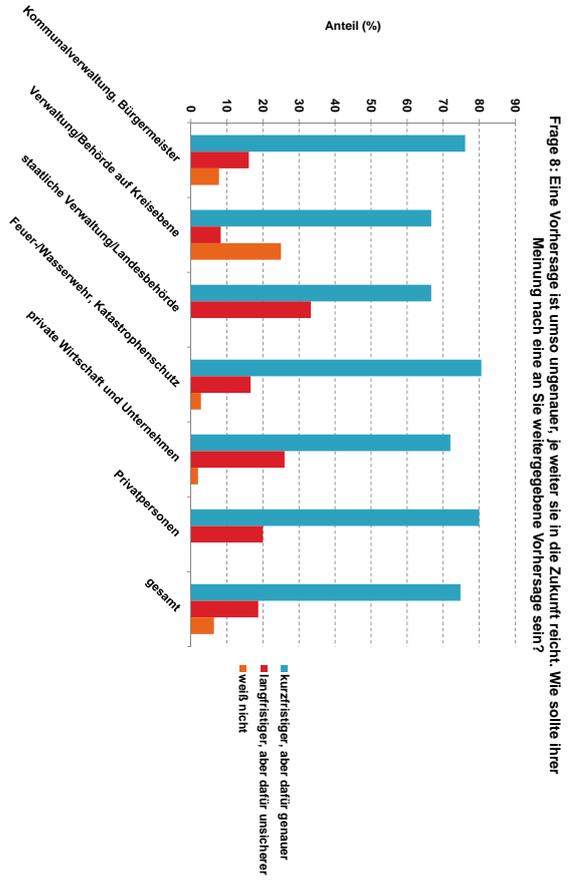
<sup>1</sup> Kleinere linkselbische Zuflüsse.



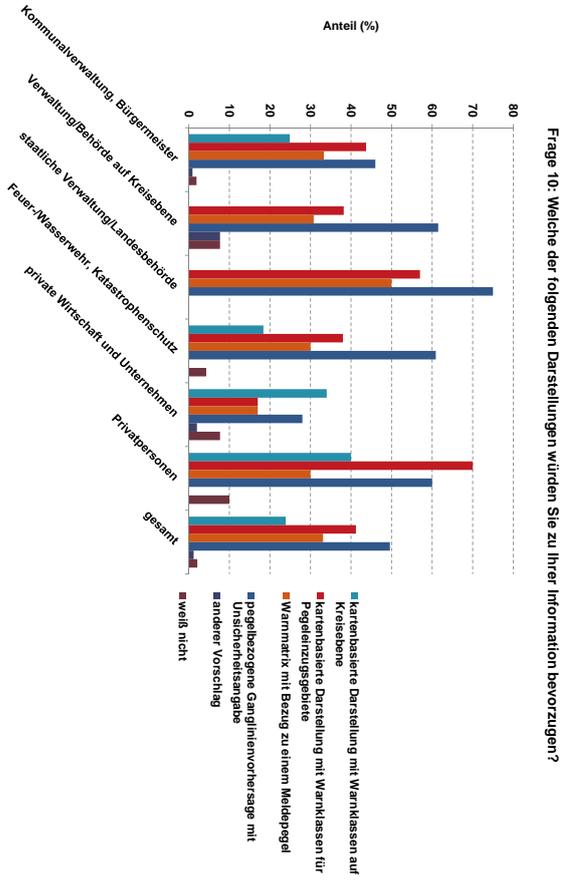
Frage 7: Sind Sie an einer ständig verfügbaren Abschätzung der zukünftigen Entwicklung des Abflussgeschehens interessiert?



Frage 9: Welchen Zeitraum muss eine Vorhersage mindestens abdecken, um für Ihre Zwecke überhaupt dienlich sein zu können?



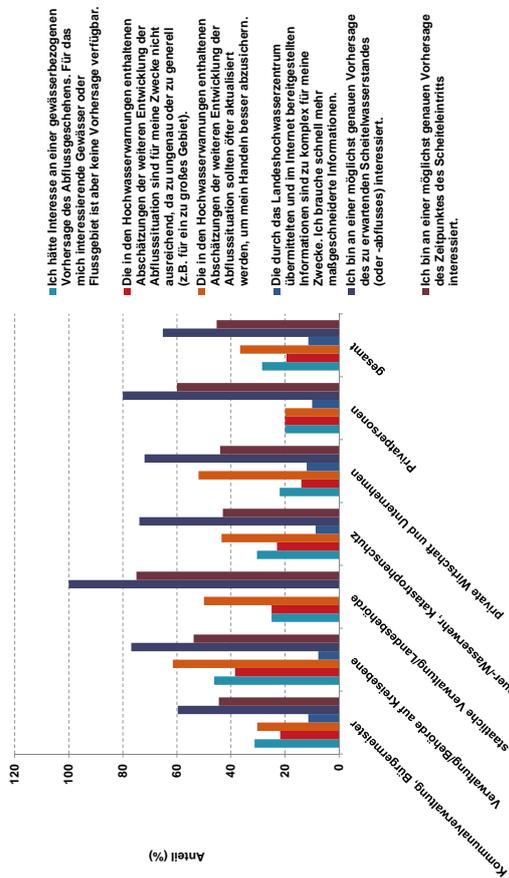
Frage 8: Eine Vorhersage ist umso ungenauer, je weiter sie in die Zukunft reicht. Wie sollte Ihrer Meinung nach eine an Sie weitergegebene Vorhersage sein?



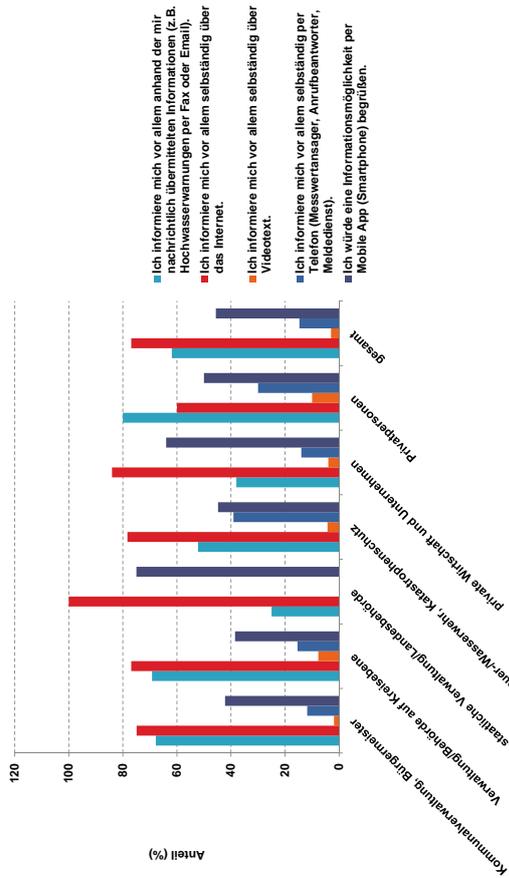
Frage 10: Welche der folgenden Darstellungen würden Sie zu Ihrer Information bevorzugen?

Abbildung 5.2.4: Histogramme der wichtigsten Befragungsergebnisse (Fragen 7 bis 10) nach Nutzergruppen.

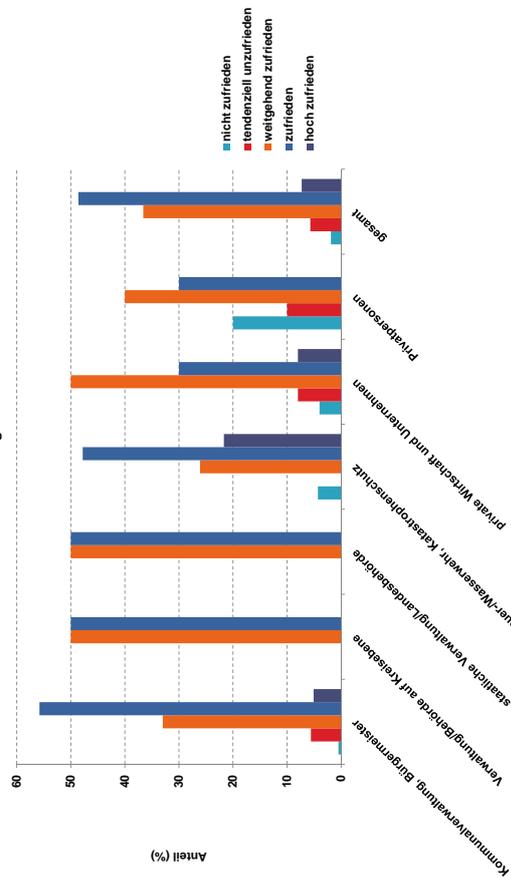
Frage 11: Welchen der angeführten Punkte würden Sie zustimmen? (IIII)



Frage 12: Welchen der angeführten Punkte würden Sie zustimmen? (IIIII)



Frage 13: Wie zufrieden sind Sie insgesamt mit den durch das Landeshochwasserzentrum übermittelten oder bereitgestellten Informationen?



Frage 14: Wie würden Sie abschließend die Arbeit des Landeshochwasserzentrums insgesamt bewerten?

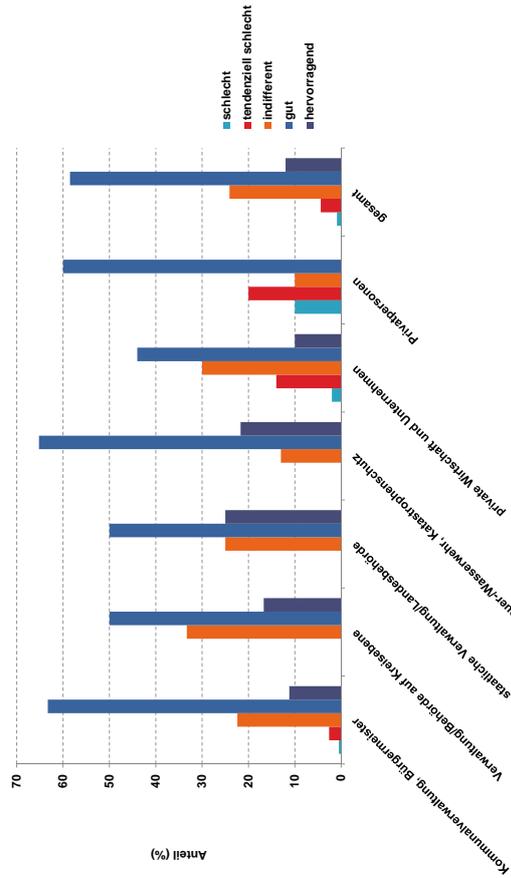
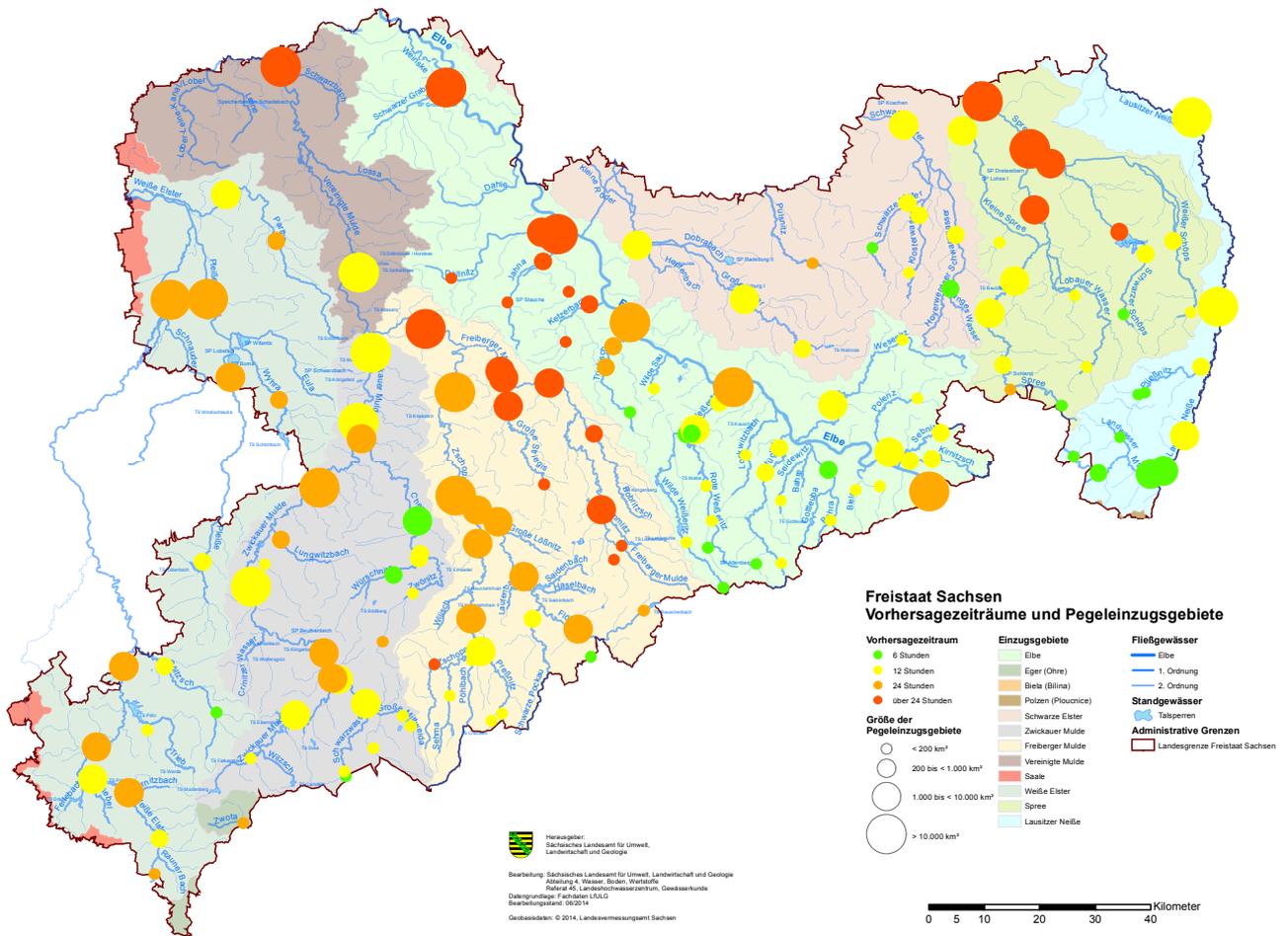


Abbildung 5.2.5: Histogramme der wichtigsten Befragungsergebnisse (Fragen 11 bis 14) nach Nutzergruppen.



**Abbildung 5.2.6:** Räumliche Verteilung der am häufigsten gewünschten mindesten Vorhersagezeiträume entsprechend Frage 9, zugeordnet zu den in den Fragen 2 bis 6 abgefragten Pegeln des Basismessnetzes. Pegel Einzugsgebietsgröße durch Durchmesser der Punkte repräsentiert; kleine Einzugsgebiete (kleiner 200 km<sup>2</sup>) sind durch die Punkte aus der ersten Größenklasse repräsentiert.

**Tabelle 5.2.2:** Übersicht zur Häufigkeit im Rahmen von Frage 15 erhobener Anmerkungen. Antworten insgesamt: 91 (mehrere Anmerkungen innerhalb einer Antwort waren möglich).

Rang	Bezug	Anzahl
1	„Zu viel Informationen“ bzw. unpraktikables Quittieren von Nachrichten	19
2	Forderung nach zusätzlichen Pegelmessungen (im Oberlauf kleinerer Gewässer)	18
3	Verfügbarkeit LHWZ-Portal, Aktualität der Daten, Einbindung von Daten Dritter	16
4	Verkleinerung der zu alarmierenden Gebiete	10
5	Lob/Bestätigung der Arbeit des LHWZ	9
6	Technische Anpassungswünsche der Informationsverteilung (z. B. Hochwasser-App)	5
7	Verkürzung Aktualisierungsintervall Hochwasserwarnungen	5
8	Ständige Verfügbarkeit von DWD-Niederschlagsdaten über das LHWZ-Portal	3
9	Kommunikation von Informationen zur Speicherwirtschaft über das LHWZ	3
10	Forderung nach Informationsverteilung bei Stromausfall (Megaphon, Sirene)	2
	Ohne direkten Bezug zum Thema	10
<b>Anmerkungen gesamt</b>		<b>100</b>

tionsverteilung (z. B. Einführung einer Hochwasser-App<sup>1</sup>), Forderungen nach einer Verkürzung des Aktualisierungintervalls der versendeten und bereitgestellten Hochwasserwarnungen<sup>2</sup>, Forderungen nach einer ständigen Verfügbarkeit von DWD-Niederschlagsdaten über das LHWZ-Portal<sup>3</sup>, nach einer Einbindung von Informationen zur Speicherbewirtschaftung<sup>4</sup> sowie nach einer verbesserten Informationsverteilung bei Stromausfall (z. B. durch Sirene oder Megaphon). Zehn übermittelte Anmerkungen hatten keinen direkten Bezug zur Umfrage und sind für das LHWZ nicht relevant. So gab es beispielsweise eine Reihe von Forderungen nach mehr Retentionsräumen, Entsiegelung, oder aber lagebezogenen Luftbildern und deren direkte Verteilung an die Nutzer.

**Schlussfolgerung 21:** *Die befragten Nutzergruppen unterscheiden sich nicht wesentlich mit Blick auf ihr Antwortverhalten. Bemerkenswert ist die große Streuung hinsichtlich der gemachten Angaben bezüglich benötigter Vorhersagezeiträume/Vorwarnzeiten. Die Arbeit und Produkte des Landeshochwasserzentrums Sachsens wurden mehrheitlich positiv bewertet. Damit wird das Landeshochwasserzentrum – zumindest bei den offiziellen Teilnehmern des Hochwassernachrichten- und Alarmdienstes – seinem Anspruch als Meinungsführer gerecht.* ❖

## 5.3 Kernaussagen

Es wurde eine Befragung mittels Fragebogen von 491 Nutzern von Produkten des Landeshochwasserzentrums durchgeführt und quantitativ-statistisch ausgewertet. Die Ausschöpfungsquote war mit ca. 69% ausgesprochen hoch. Nutzergruppenspezifischen Antworten waren statistisch oftmals nicht unterscheidbar. Bei vier Fra-

gen/Antwortmöglichkeiten zeigten sich jedoch nutzergruppenspezifische Unterschiede.

Die gewählte quantitative Untersuchungsmethodik erwies sich weitgehend als vorteilhaft; eine recht Große Menge an Daten konnte kostengünstig in kurzer Zeit aufgenommen und automatisiert ausgewertet werden. Allerdings weisen quantitative Erhebungsmethoden auch Nachteile auf. Die Flexibilität der Erhebung ist stark eingeschränkt; während der Untersuchung kann nicht auf den Befragten eingegangen werden und Verständnisschwierigkeiten, aber auch Verbesserungsvorschläge hinsichtlich der Fragestellung, bleiben unentdeckt. Grundsätzliche Schwierigkeiten beim Verständnis gestellter Fragen oder – im ungünstigsten Falle – ein Missverständnis von angebotenen Antwortoptionen<sup>5</sup> gefährden die Aussagekraft der Erhebung. Weiterhin ermitteln quantitative Methoden nicht die Ursache einer bestimmten Einschätzung oder Befindlichkeit, z. B. durch Unzufriedenheit.

Die Befragung wurde daher mit qualitativen Elementen angereichert, um den Befragten die Möglichkeit zu bieten, eigene Erfahrungen mit in die Beantwortung der Fragen einzubringen. Allerdings war so dennoch nicht auszuschließen, dass Fragen durch die Befragten missinterpretiert und die Ergebnisse dadurch verzerrt wurden. Das mögliche Vorhandensein solcherlei Effekte zählt zu den generellen Nachteilen quantitativer Erhebungen.

Mit Blick auf die in der Einleitung beschriebenen Forderungen nach einem sächsischen Hochwasserfrühwarnsystem für kleine Einzugsgebiete lassen sich die Ergebnisse der quantitativ-statistischen Analyse zu den folgenden Kernaussagen zusammenfassen:

- Die Befragten wünschen selektive, ereignisbezogene Informationen bzw. informieren sich ereignisbezogen (und nicht regelmäßig).
- Einer kurzfristigen, dafür genaueren Warnung wird gegenüber einer langfristigen und stärker mit Unsicherheiten behafteten Abschätzung der Vorzug gewährt.
- Die angegebenen *mindestens* erforderlichen Vorhersagezeiträume liegen bei  $\leq 3$  h (9% der Nutzer),  $\leq 6$  h (27%),  $\leq 12$  h (50%),  $\leq 24$  h (83%),  $\leq 72$  h (98%).

<sup>1</sup>Ebenfalls mittlerweile umgesetzt durch die App „MeinePegel“ des Länderübergreifenden Hochwasserportals (LHP).

<sup>2</sup>Es handelt sich dabei im sächsischen Kontext um qualifizierte Einschätzungen der aktuellen meteorologischen und hydrologischen Situation und der weiteren Entwicklung derselben.

<sup>3</sup>Die Verfügbarkeit von Niederschlagsdaten des DWD via des LHWZ-Webportals *außerhalb* von Hochwasserlagen war zum Zeitpunkt der Erhebung aus juristischen Gründen nicht gegeben, konnte aber zwischenzeitlich auf Basis einer novellierten Rechtslage (DWD-Gesetz) umgesetzt werden.

<sup>4</sup>Dazu gibt es seitens der Landestalsperrenverwaltung Sachsen (LTV) ein dediziertes Portal, die sog. Talsperrenmeldezentrale (<http://www.ltv.smul.sachsen.de/tmz/>).

<sup>5</sup>Ein Effekt, der nicht anhand der erhobenen Daten, sondern *per se* nur durch Rückfragen bei den Befragungssubjekten identifiziert werden kann.

- Die von den Nutzern gewünschten pegelbezogenen Vorhersagezeiträume korrelieren nicht mit der Größe der jeweiligen Pegel Einzugsgebiete.
- Ein Vorhersagezeitraum  $\leq 12$  h wird von einer knappen Mehrheit der Nutzer in kleinen Einzugsgebieten (kleiner  $200 \text{ km}^2$ ) als ausreichend angesehen. Ein Vorhersagezeitraum von  $\leq 24$  h würde eine deutliche Mehrheit in kleinen Einzugsgebieten zufrieden stellen.
- Zur Frühwarnung wird die Darstellung von Ganglinien mit Unsicherheitsbändern, als auch ein klassifiziertes Vorhersageprodukt für Pegel Einzugsgebiete („Ampelkarte“) am häufigsten gewünscht.
- Warnungen auf Kreisebene und pegelbezogene Warnmatrizen werden von der überwiegenden Zahl der Nutzer nicht bevorzugt.
- Knapp ein Drittel der offiziellen Nachrichtenempfänger schätzt ein, dass für das sie interessierende Gebiet keine Vorhersage bzw. Abschätzung der weiteren meteorologischen und hydrologischen Entwicklung vorhanden ist. Das trifft vor allem auf die Nutzer in kleinen Einzugsgebieten zu.
- Der Informationsgehalt der bisher verbreiteten Hochwasserwarnungen wird von deren Nutzern als angemessen eingestuft.
- Die durch das LHWZ verbreiteten Informationen werden lediglich von rund 10 % der offiziellen Nachrichtenempfänger als schwer verständlich und „nicht maßgeschneidert“ wahrgenommen.
- Einer regelmäßigeren und häufigeren Verteilung der Hochwasserwarnungen wird von rund 37 % der Nutzer beigemessen, ihr Handeln besser abzusichern, auch, wenn keine Veränderung der meteorologischen und hydrologischen Lage erfolgt ist. Die Nutzer aus drei von sechs Nutzergruppen („Verwaltung/Behörde auf Kreisebene“, „staatliche Verwaltung/Landesbehörde“ sowie „private Wirtschaft und Unternehmen“) sprechen sich gar mehrheitlich ( $> 50$  %) für eine häufigere Verteilung von Hochwasserwarnungen aus.
- Die Mehrheit der Nutzer ( $> 65$  %) ist an einer möglichst verlässlichen Prognose des Scheitelwasserstandes interessiert. Die Kenntnis des Zeitpunkts des Scheiteleintritts ist für rund 45 % der Nutzer wichtig.
- Dem Internet kommt – im Vergleich zu anderen Nachrichtenwegen (wie Fax, Videotext, Messwertansager) – bei allen Gruppen bis auf die Gruppe „Privatpersonen“ die größte Bedeutung bei der Verteilung von Hochwasserinformationen zu.
- Die nachrichtlich (per Fax oder Email) übermittelten amtlichen Hochwasserwarnungen werden ebenfalls von einer Mehrheit der Nutzer zur Information genutzt.
- Die Information per Videotext spielt für sehr wenige Befragte eine Rolle ( $< 5$  %). Anteilig nutzen weiterhin lediglich ca. 15 % die Informationsmöglichkeiten per Telefon.
- Dennoch wird die Möglichkeit der Telefonabfrage von Messstellen (Messwertansager) – beispielsweise im Falle gestörter Internetzugriffsmöglichkeiten – als sehr wichtig erachtet.
- Fast die Hälfte aller Nutzer wünscht eine Informationsmöglichkeit per dedizierter Smartphone-App. Die Zustimmung unter den privaten/privatwirtschaftlichen Nutzern ist dabei größer als bei den Nutzern aus den Verwaltungen sowie den Leitstellen von Feuer- und Wasserwehren und Katastrophenschutz.
- Einer breiten Verfügbarkeit der IT-Infrastruktur des LHWZ wird – besonders im Hochwasserfall – eine hohe Bedeutung beigemessen.
- Die befragten Nutzergruppen unterscheiden sich signifikant hinsichtlich der gegebenen Antworten bei der Frage nach der gewünschten Häufigkeit der Aktualisierung der Hochwasserwarnungen und deren Übermittlung per Email oder Fax.
- Weiterhin antworteten die Befragten verschiedener Nutzergruppen unterschiedlich auf die Fragen nach der Qualität der LHWZ-Produkte und nach der Güte der Arbeit des LHWZ.
- Darüber hinaus waren keine signifikanten Unterschiede in den Antworthäufigkeiten der verschiedenen Nutzergruppen feststellbar.

**Schlussfolgerung 22:** Die potentiellen Nutzer eines Hochwasserfrühwarnsystems für Sachsen geben an, Vorhersagezeiträume von 12 oder 24 Stunden zu benötigen, um geeignete Hochwasserabwehrmaßnahmen zu ergreifen. Die Information über den zu erwartenden Maximalwasserstand wird als wichtigster Inhalt der Warnung erachtet. ❖

## 5.4 Diskussion

Ein Schlüsselproblem, welches überwunden werden muss, um auf Basis hydrologischer Vorhersagen einen Nutzen für das Hochwasserrisikomanagement für kleine Einzugsgebiete zu schaffen, liegt in der mit abnehmender Gebietsgröße ansteigenden Vorhersageunsicherheit. Während für größere Flüsse bestenfalls lediglich oberstromige Pegelbeobachtungen mittels eines hydraulischen Modells zur Erstellung einer recht exakten Vorhersage ausreichend sind, so ist für kleine Einzugsgebiete die Verwendung von N-A-Modellen und quantitativen Niederschlagsvorhersagen nötig, was erhebliche Unsicherheiten einbringt. Überdies wächst die Unsicherheit natürlich mit dem Vorhersagehorizont, also der Zeit, welche für das Planen und Ausführen von Hochwasserabwehrmaßnahmen verfügbar ist.

Die Schwierigkeit dabei ist, dass solcherlei Unsicherheiten aktuell noch nicht vollständig und korrekt quantifizierbar sind, für das Ereignismanagement aber bisher eher „deterministische“ Informationen gefragt sind (z. B.: „Wird eine bestimmte Alarmstufe überschritten – ja oder nein?“). Es ist auf dieser Grundlage recht leicht einsehbar, dass eine deterministische Herangehensweise bei der Risikobewertung auf Basis unsicherer Vorhersagen den Nutzen der Vorhersage schmälert und gleichzeitig die Gefahr von Falsch- oder Nicht-Alarmierungen erhöht (TODINI, 2004).

Weiterhin ist die Frage nach der Eignung einer probabilistischen Vorhersage für die Risikobewertung durch unterschiedliche Nutzergruppen nicht ohne zusätzliche Untersuchungen zu beantworten. Die verfügbare Literatur lässt den Schluss zu, dass probabilistische Vorhersagen zwar einen zusätzlichen Nutzen für fachlich versierte oder institutionelle Nutzer bieten können (beispielsweise MC-CARTHY ET AL., 2007; FRICK & HEGG, 2011; WETTERHALL ET AL., 2013; VOGELBACHER, 2014) aber nicht unbedingt die Risiko- und Gefahrenbewertung durch die breite Bevölkerung verbessern (z. B. BRILLY & POLIC, 2005; GIGERENZER ET AL., 2005; MORSS ET AL., 2008).

Auf Basis der hier vorgestellten Erhebung lässt sich keine klare Aussage darüber treffen, ob probabilistische Vorhersagen von den Endnutzern akzeptiert oder gar begrüßt würden beziehungsweise inwieweit diese in die Bewertung der Warnlage mit einfließen würden. Auf der einen Seite sprachen sich die Befragten klar für „kurzfristige, dafür genauere“ Vorhersagen aus (Frage 8, siehe Abb. 5.2.4), andererseits bezeichneten in Zusammenhang mit Frage 10 die meisten Befragten (vier von sechs Nutzergruppen) pegelbezogenen Ganglinien mit Unsicherheitsbändern als bevorzugtes Warnprodukt (knapp vor einer kartenbasierten Darstellung von Warn-/bzw. Gefährdungsklassen auf Einzugsgebietsebene). Allerdings können – wie bereits angeklungen – auf Grundlage der gewonnenen Daten keine Rückschlüsse auf die unregistrierten Nutzer (also Laien) von Produkten des LHWZ (welche z. B. auf das öffentliche Internetangebot unter <http://www.hochwasserzentrum.sachsen.de> zugreifen) gezogen werden.

Abschließend ist festzustellen, dass sich die Forderungen der Jeschke-Kommission (JESCHKE ET AL., 2010) nach einem Hochwasserfrühwarnsystem für kleine Einzugsgebiete vor dem Hintergrund der hier vorgestellten Befragungsergebnisse konkretisieren lassen. Und zwar dergestalt, dass von den potentiellen Nutzern solch eines Systems vor allem eine unmittelbare, ereignisbezogene kürzest- und kurzfristige Abschätzung der Wasserstands-entwicklung gewünscht wird. Es sollte dabei auch eher eine Prognose maximaler Wasserstände, als eine Vorhersage (Eintrittszeit derselben sowie zeitlicher Verlauf des Wasserstandes) im Vordergrund stehen. Besonders von den Befragten betont wurde, dass ein avisiertes Frühwarnsystem stets technisch verfügbar sein muss, obgleich sich die Nutzer nur ereignisbezogen informieren möchten beziehungsweise informiert werden möchten.

Diese Ansprüche sollten im weiteren Verlauf mit dem fachlich Machbaren abgeglichen werden. Für Sachsen haben insbesondere die Erkenntnisse aus der BMBF-RIMAX-Förderaktivität (MERZ ET AL., 2009), wie beispielsweise KNEIS & HEISTERMANN (2009) oder GRUNDMANN (2010), deutlich die Grenzen der Vorhersagbarkeit hochwasserrelevanter hydrologischer Prozesse in kleinen, schnell reagierenden Einzugsgebieten aufgezeigt (siehe dazu auch den Abschnitt 3.2). Im Lichte dieser Untersuchungen wird für die verschiedenen Naturräume Sachsens eine Ableitung einer *mindesten Gebietsgröße* erfolgen, für die eine für die

Frühwarnung vor Hochwasser verwendbare hydrologische Vorhersage ableitbar ist (siehe Kapitel 6 bis 8).

Der Wunsch des Landeshochwasserzentrums ist es also, Gebietseinheiten ausweisen zu können, für die sich Nutzeransprüche, fachliche Machbarkeit, Datenlage und nicht zuletzt politisch-administrative Randbedingungen einer Hochwasservorhersage in Einklang bringen lassen und für diese Gebiete ein operationelles Hochwasserfrühwarnsystem zu entwickeln und zu implementieren.

**Schlussfolgerung 23:** *Es existiert eine deutliche Diskrepanz zwischen den von den Nutzern als notwendig erachteten Vorwarnzeiten und dem mittels hydro-meteorologischen Prozeduren verlässlich abdeckbaren Vorhersagezeitraum. Vorwarnungen für Zeiträume von drei und mehr Stunden sollten möglichst mit begleitenden Unsicherheitsangaben kommuniziert werden, was wiederum die Verwendung probabilistischer Antriebe erfordert. Dazu müssten die Nutzer in der Lage sein, diese Unsicherheitsinformationen zu bewerten und in konkrete Handlungen zu übersetzen. Damit einher geht, dass dann die Risikobewertung bei jedem einzelnen Nutzer erfolgen muss.* ❖

## 6 Erste Verifikation operationell verfügbarer meteorologischer Antriebsdaten

Kapitel 2 hat deutlich aufgezeigt, dass für eine Hochwasserfrühwarnung dringend quantitative Niederschlagsvorhersagen einbezogen werden sollten. Dabei ist eine wichtige Frage: Wie treffsicher sind – beispielsweise durch den Deutschen Wetterdienst (DWD) bereitgestellte – quantitative Vorhersageprodukte? Exemplarisch soll diese Frage hierin zunächst für zwei DWD-Produkte beantwortet werden. Zusätzlich soll im Zuge dieser Untersuchung die Treffsicherheit von mittels Radar geschätzten Niederschlägen untersucht werden. Als Referenz dienen aus Ombrometerdaten interpolierte Niederschlagsfelder („Beobachtungen“).

Es werden für einen Zeitraum von gut drei Jahren (04/2011 bis einschließlich 06/2014) zwei quantitative Niederschlagsvorhersageprodukte des DWD (aus NWP-Modell COSMO-DE und die sogenannte „Quantilvorhersage“ der RWB Leipzig<sup>1</sup>) gegenüber dem RADOLAN-RW-Komposit und Stationsbeobachtungen (Ombrometerdaten) auf räumlicher Skala von Flussgebieten mit Höheneinteilung (für Sachsen: 16) verifiziert. Betrachtet werden jeweils zwei 6-h-Vorhersageintervalle für Vorhersagezeitpunkte zu den beiden synoptischen Hauptterminen 06:00 UTC sowie 18:00 UTC. Verglichen werden die 6-h-Summen. Als Vergleichsmethoden kommen dabei, neben einfachen statistischen Maßen, Häufigkeitskarten und Diagramme (z. B. Q-Q-Plots), Summenlinienvergleiche sowie diverse Gütemaße zur Anwendung.

Von den untersuchten quantitativen Niederschlagsvorhersageprodukten verifizieren COSMO-DE und das 90er-Perzentil der Quantilvorhersage am besten. Die mittleren Gebietsniederschläge des radarbasierten RADOLAN-Produkts weisen in der räumlichen Verteilung hohe Übereinstimmungen mit der Beobachtung auf, liegen allerdings im Hinblick auf die Niederschlagsmenge systematisch

leicht unter den Beobachtungen (in der Regel wenige Prozentpunkte).

Im Hinblick auf eine bevorzugte Verwendung bestimmter Niederschlagsvorhersageprodukte zur Gewinnung hydrologischer Vorhersagen (beispielsweise für die Hochwasserfrühwarnung für kleine Einzugsgebiete), sind auf Basis der erlangten Ergebnisse keine pauschalen Aussagen möglich. Es muss beachtet werden, dass gegenüber dem raum-zeitlich hoch aufgelösten COSMO-DE-Produkt die Quantilvorhersage der RWB Leipzig relativ generell ist (6-h-Intervalle, Gebietsmittel für Gebiete von ca. 700 bis ca. 3.000 km<sup>2</sup>). Bezogen auf den Meilensteinplan des Gesamtprojekts (Tabelle 3.4.2) handelt es sich bei der Untersuchung um Meilenstein Nummer 2.

**Schlussfolgerung 24:** *Quantitative Niederschlagsvorhersagen bringen die maßgeblichen Unsicherheiten in kleinräumige hydrologische Vorhersagen ein. Die Kenntnis ihrer Güte ist daher wichtig mit Blick auf die potentiell zu erzielende Güte hydrologischer Vorhersagen.* ❖

### 6.1 Übersicht der für die Verifikation verwendeten Gebietszuschnitte

Die Quantilvorhersagen der RWB Leipzig beziehen sich in ihrer räumlichen Unterteilung auf die Flussgebiete Sachsens. Vor allem um orographischen Effekten Rechnung zu tragen, werden die Hauptflussgebiete weiter unterteilt (siehe Abbildung 6.1.1 und Tabelle 6.1.1). Aus Gründen der Vergleichbarkeit beziehen sich alle weiteren Untersuchungen auf die dargestellten Flussgebiete.

Die Einzugsgebietsgrößen der betrachteten Flussgebiete erstrecken sich von knapp 700 km<sup>2</sup> bis etwa 3.000 km<sup>2</sup> mit einem Median von 1.200 km<sup>2</sup> (siehe Tabelle 6.1.1). Diese Raumskala steht in gewissem Gegensatz zu der Skala kleiner Einzugsgebiete, wie sie von verschiedenen Autoren mit etwa 200 bis 400 km<sup>2</sup> definiert ist (LUBW, 2013; DAVIS, 2001; COLLIER, 2007). Da die Ermittlung der

<sup>1</sup>Da es sich hier nicht um ein probabilistisches Produkt im engeren Sinne handelt (wie z. B. ein Ensemble-Produkt, was auch eine entsprechende Methodik bei der Verifikation erfordern würde), wird die Quantilvorhersage in diesem Kapitel mit untersucht.

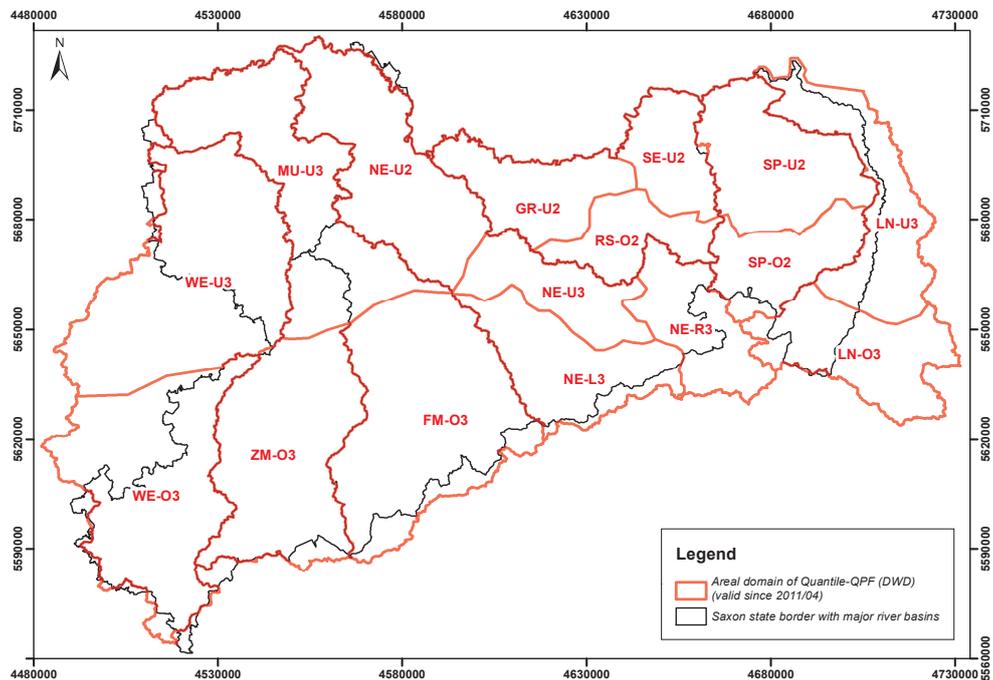


Abbildung 6.1.1: Karte der Flussgebiete in Sachsen sowie den Teilgebieten der gebietsbezogenen Quantilvorhersage der RWB Leipzig. Gemeinsames Bezugssystem: Gauß-Krüger, Zone 4 (EPSG-Code 31468).

Tabelle 6.1.1: Übersicht Teilgebiete der gebietsbezogenen Quantilvorhersage der RWB Leipzig.

ID	Gebietskennung	Name	$A_E$ (km <sup>2</sup> )	Mittlere Höhe (m ü. NN)
1	WE-U3	Weißer Elster, unterhalb 300 m ü. NN	2.722	196
2	WE-O3	Weißer Elster, oberhalb 300 m ü. NN	2.295	435
3	MU-U3	Vereinigte Mulde, unterhalb 300 m ü. NN	2.038	165
4	ZM-O3	Zwickauer Mulde, oberhalb 300 m ü. NN	2.022	502
5	FM-O3	Freiberger Mulde, oberhalb 300 m ü. NN	2.577	541
6	NE-U2	Nebenzuflüsse der Elbe, unterhalb 200 m ü. NN	1.734	139
7	NE-U3	Nebenzuflüsse der Elbe, unterhalb 300 m ü. NN	799	199
8	NE-L3	Linke Nebenzuflüsse der Elbe, oberhalb 300 m ü. NN	1.154	443
9	NE-R3	Rechte Nebenzuflüsse der Elbe, oberhalb 300 m ü. NN	881	345
10	GR-U2	Große Röder, unterhalb 200 m ü. NN	908	142
11	SE-U2	Schwarze Elster, unterhalb 200 m ü. NN	662	138
12	RS-O2	Große Röder und Schwarze Elster, oberhalb 200 m ü. NN	646	248
13	SP-U2	Spree, unterhalb 200 m ü. NN	1.302	148
14	SP-O2	Spree, oberhalb 200 m ü. NN	797	297
15	LN-U3	Lausitzer Neiße, unterhalb 300 m ü. NN	1.241	205
16	LN-O3	Lausitzer Neiße, oberhalb 300 m ü. NN	1.159	426

Vorhersagegüte der Quantilvorhersage ein Hauptbestandteil dieser Untersuchung ist, wird dieser Skalenunterschied allerdings zugelassen.

**Schlussfolgerung 25:** *Die Güte quantitativer Niederschlagsvorhersagen ist unter anderem abhängig von Größe und Schärfe des zugrunde gelegten Bilanzgebietes. Während aus meteorologischer Sicht möglicherweise die ungefähre regionale Lage eines Niederschlagsgebietes ausreichend sein mag, so spielt für hydrologische Vorhersagen – gerade mit Blick auf kleine Einzugsgebiete – die räumlich (und zeitlich) exakte Verortung vorhergesagter, kleinräumiger Niederschläge die entscheidende Rolle.* ❖

## 6.2 Untersuchte Produkte

Das Landeshochwasserzentrum Sachsen bezieht zur Erfüllung seiner Aufgaben eine Reihe operationeller Daten vom DWD. Produkte zur Quantifizierung des Niederschlags (QPEs – Quantitative Precipitation Estimates; siehe Abschnitt 2.1) sind dabei stündlich aufgelöste Ombrometerdaten und zeitlich hoch aufgelöste Radarfelder (RADOLAN-Produkt). Im Bereich der quantitativen Niederschlagsvorhersage (QPFs – Quantitative Precipitation Forecasts; siehe ebenfalls Abschnitt 2.1) werden Outputs aktueller Modellläufe der operationellen NWP-Modelle COSMO-DE sowie COSMO-EU<sup>1</sup> verwendet. Darüber hinaus werden zweimal täglich durch die Regionale Wetterberatung des DWD in Leipzig sogenannte Quantilvorhersagen versandt.

### 6.2.1 Ombrometerdaten

Für die angestrebten Untersuchungen dienen die Ombrometerdaten des DWD als Referenz und müssen zunächst auf eine einheitliche raum-zeitliche Auflösung mit den angesprochenen Quantilvorhersagen gebracht werden. Im Hinblick auf die angestrebte zeitliche Auflösung beim Vergleich (6 h) sind lediglich vollautomatische Messstationen mit stündlicher Auflösung relevant (und keine Tagessammler), die zunächst stationsweise auf 6-h-Summen kumuliert werden. Räumlich müssen die Stationsdaten auf die Teilgebiete der Quantilvorhersagen (Abbildung 6.2.1) aggregiert werden. Dazu ist die Interpolation der 6-h-Summen und anschließende Bildung des Gebietsmittels erforderlich. Um

ein räumlich konsistentes Niederschlagsfeld innerhalb der Grenzen der Quantilvorhersage zu erhalten, wurden Stationen innerhalb eines 25-km-Puffers in die Berechnungen einbezogen (vgl. Abbildung 6.2.1 und Tabelle 6.2.1).

Für Flussgebietsanteile in Polen und Tschechien wurden keine Stationsdaten verwendet. Im Hinblick auf orographische Effekte ist die Beachtung südlich des Erzgebirgshauptkamms liegender Stationen bei der Gebietsmittlbildung ohnehin fragwürdig. Im Bereich der Lausitzer Neiße müssen einige Flächen extrapoliert werden, was vornehmlich im Bereich des Isergebirges (LN-O3 in Abb. 6.1.1) zu Unterschätzungen führen kann. Diese Einschränkungen werden allerdings im Rahmen dieser überblicksmäßigen Untersuchung in Kauf genommen. Hauptgrund für das Auslassen von Stationen war die zum Zeitpunkt der Untersuchung nicht gegebene Verfügbarkeit der PL- und CZ-Daten auf dem DWD-Daten-Server, welcher genutzt wurde, um einen komfortablen und automatisierbaren Abruf von Stationsdaten darstellen zu können.

### 6.2.2 Quantilvorhersagen der RWB Leipzig

Die Regionale Wetterberatung des DWD in Leipzig (vor 2014: Regionalzentrale) stellt für ihren Zuständigkeitsbereich eine flussgebietsbezogene probabilistische Niederschlagsvorhersage bereit (siehe Abbildung 6.1.1). Die Vorhersage wird dabei für zwei Vorhersagezeitpunkte, konkret 06:00 UTC und 18:00 UTC erstellt. Grundlage des Produkts ist die Einschätzung der weiteren synoptischen Entwicklung durch einen Meteorologen auf Basis aller zur Stunde verfügbaren Informationen (inkl. NWP-Outputs).

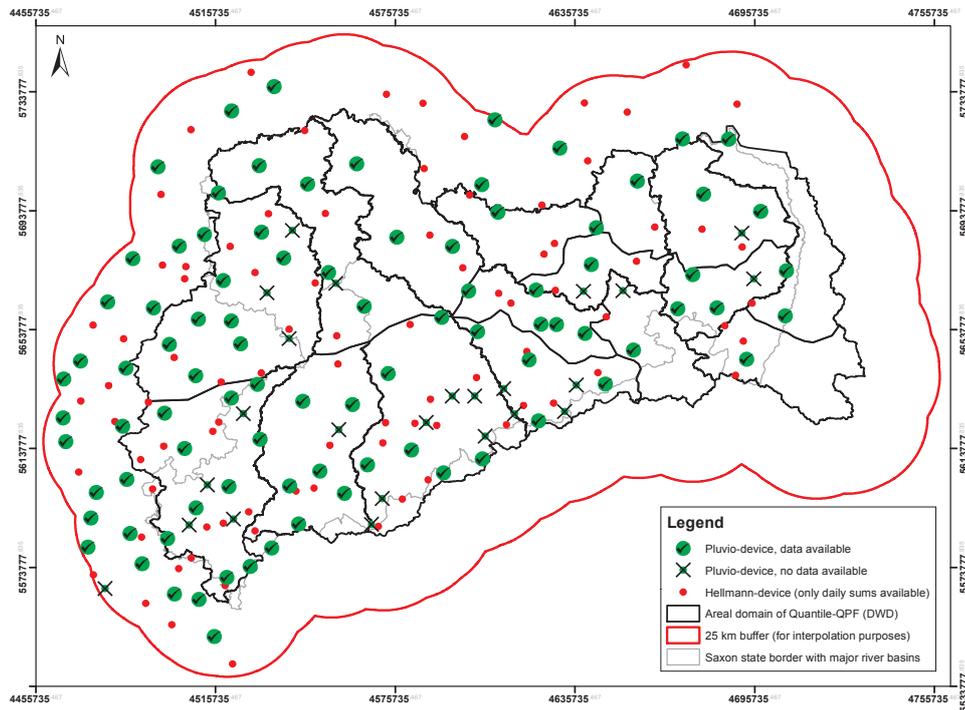
Die Quantilvorhersage beinhaltet Werte für das 90er-, 50er- sowie 10er-Perzentil – also Werte, welche mit einer Wahrscheinlichkeit von 90, 50 bzw. 10 % überschritten werden – für die kommenden beiden 6-Stunden-Intervalle und die zwei darauf folgenden 12-Stunden-Intervalle, insgesamt also für einen Vorhersagezeitraum von 36 Stunden. Die Vorhersagen werden als Textfiles geliefert; ein typischer Aufbau und Inhalt solch eines Files ist aus Abbildung 6.2.3 ersichtlich. Exemplarisch soll ein Block aus dem entsprechenden File besprochen werden (vgl. Abbildung 6.2.2).

Der gezeigte Block beinhaltet die Vorhersage für das Flussgebiet Freiburger Mulde oberhalb 300 m ü. NN (FM-O3) für den 09.01.2012, Vorhersagezeitpunkt 06:00 UTC für die Vorhersagezeiträume 06:00–12:00, 12:00–18:00, 18:00–06:00 sowie 06:00–18:00 UTC. Die in den Spalten „090“, „050“ und „010“ angegebenen Werte sind entspre-

<sup>1</sup> Wurde 2015 durch ICON-EU abgelöst.

Tabelle 6.2.1: Einbezogene DWD-Ombrometer und deren Datenverfügbarkeit.

Stationsname	Zeitraum	Ausfall (d)	Stationsname	Zeitraum	Ausfall (d)
Geringswalde-Altgeringswalde	1952–2014	9	Muskau, Bad	1891–2014	4
Aue	1881–2014	2	Lohmen/Sachsen	1980–2014	25
Kubschütz, Kr. Bautzen	1863–2014	4	Oschatz	1977–2014	3
Bobeck	1994–2014	15	Osterfeld	1984–2014	12
Weischlitz-Heinersgrün	1903–2014	2	Plauen	1946–2014	14
Boxberg	1961–2014	2	Pulsnitz	1881–2014	101
Schönwölkau-Brinnis	1993–2014	8	Kemberg-Radis	1906–2014	2
Bucha	1936–2014	16	Rehau	1903–2014	5
Carlsfeld	1989–2014	14	Schleiz	1951–2014	11
Chemnitz	1935–2014	0	Selb/Oberfranken-Lauterbach	1993–2014	6
Dippoldiswalde-Reinberg	1910–2014	9	Tannenberg	1934–2014	7
Doberlug-Kirchhain	1891–2014	16	Starkenber-Tegkwitz	1994–2014	2
Dresden-Klotzsche	1935–2014	5	Harth-Pöllnitz Neundorf	1989–2014	2
Dresden-Hosterwitz	1949–2014	157	Zeititz	1952–2014	2
Dresden-Strehlen	1935–2014	20	Freyburg/Unstrut-Zeuchfeld	1905–2014	3
Eilenburg	1897–2014	0	Zinnwald-Georgenfeld	1971–2014	29
Elster, Bad-Sohl	1881–2014	8	Lichtentanne	1863–2014	7
Elsterwerda	1974–2014	3	Rosenthal-Bielatal	1970–2014	2
Erlbach-Eubabrunn	1961–2014	6	Sohland/Spree	1999–2014	5
Gera-Leumnitz	1951–2014	0	Uhlstädt-Kirchhasel-Zeutsch	2002–2014	3
Görlitz	1858–2014	0	Klingenthal-Kamerun	2002–2014	7
Graustein	1962–2014	2	Crossen/Elster-Nickelsdorf	2002–2014	3
Weißenfels-Wengelsdorf	1948–2014	24	Nossen	1891–2014	3
Markranstädt-Großlehna	1968–2014	3	Steben, Bad	2003–2014	0
Halle-Kröllwitz	1951–2014	3	Belgershain	2006–2014	12
Hirschberg	1900–2014	2	Grimma-Kleinbothen	2006–2014	17
Bertsdorf-Hörnitz	1881–2014	8	Frankenberg-Altenhain	2007–2014	2
Hof	1946–2014	1	Ponitz	2006–2014	2
Hohenberg/Eger	1931–2014	8	Treuen	2005–2014	3
Stützengrün-Hundshübel	1927–2014	2	Marienber-Rübenau	2006–2014	2
Jena (Sternwarte)	1824–2014	0	Heyda bei Riesa	2006–2014	2
Klettwitz	1996–2014	2	Strauch	2006–2014	3
Klitzschen bei Torgau	1994–2014	6	Dürrhennersdorf	2007–2014	2
Leipzig-Holzhausen	1924–2014	2	Deutschneudorf-Brüderwiese	2006–2014	4
Leipzig/Halle	1972–2014	3	Jeßnitz	2007–2014	3
Ostritz	1910–2014	59	Hoyerswerda	2009–2014	27
Lichtenhain-Mittelndorf	1991–2014	4	Sankt Egidien-Kuhschnappel	2008–2014	2
Remptendorf	1927–2014	30	Langenwetzendorf-Göttendorf	2006–2014	5
Lobenstein, Bad	1954–2014	2	Naumburg/Saale-Kreipitzsch	2007–2014	3
Schöntheichen-Cunnersdorf	1992–2014	7	Hähnichen-Trebus	2007–2014	4
Marienber	1955–2014	16	Wilsdruff-Mohorn	2007–2014	4
Raschau	1994–2014	21	Pegau	2008–2014	3
Garsebach bei Meißen	1956–2014	3	Krölpa-Rockendorf	2007–2014	5
Meuselwitz	1899–2014	8	Crimmitschau-Mannichswalde	2008–2014	0
Schmieritz-Weltwitz	1972–2014	2			



**Abbildung 6.2.1:** Karte der einbezogenen Niederschlagsstationen mit eingezeichneten Flussgebiets- und Teilgebietsgrenzen der gebietsbezogenen Quantilvorhersage der RWB Leipzig. Gemeinsames Bezugssystem: Gauß-Krüger, Zone 4 (EPSG-Code 31468).

FLUSS	ASGBTG	ZEIT	ITRVL	090	050	010
FM-O3	090112	0600	06–12	000	000	000
			12–18	000	005	006
			18–06	005	006	007
			06–18	000	000	000

**Abbildung 6.2.2:** Quantilvorhersage für das Vorhersagegebiet FM-O3 für den 09.01.2012, Vorhersagezeitpunkt 06:00 UTC.

chend die mit einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von 90/50/10 % vorhergesagten Niederschlagsmengen in mm. Dabei bedeutet z. B. ein Wert von „006“ eine vorhergesagte Niederschlagshöhe von 5,5 bis 6,4 mm usw. Als Besonderheit repräsentiert ein Wert von „000“ einen erwarteten Bereich der Niederschlagshöhe im zugehörigen Zeitintervall von 0,0 bis 4,4 mm. Für geringe Niederschlagshöhen existiert somit eine gewisse Unschärfe in diesem quantitativen Niederschlagsvorhersageprodukt.

### 6.2.3 COSMO-DE

Bei COSMO-DE (früher LMK: Lokalmmodell Kurzzeitfrist; BALDAUF ET AL., 2009) handelt es sich um ein seit 2007 operationelles numerisches Wettervorhersagemodell (genauer: ein nicht-hydrostatisches, kompressibles Aus-

schnittsmodell), welches im Sinne eines Nesting-Ansatzes die DWD-Modellkette Globalmodell (GME)<sup>1</sup> → Lokalmmodell Europa (COSMO-EU)<sup>2</sup> auf kleinere raum-zeitliche Skalen erweitert. Sein Modellgebiet erstreckt sich über ganz Deutschland, die Schweiz, Österreich und Teile der übrigen Nachbarstaaten. Das Landeshochwasserzentrum bezieht vom DWD bestimmte COSMO-DE-Ergebnisfelder für einen verkleinerten Ausschnitt der COSMO-DE-Domäne (siehe Abbildung 6.2.4). Die räumliche horizontale Auflösung des Modells beträgt dabei rund 2,8 km.

Mit COSMO-DE ist – zumindest grob – die direkte Simulation von Konvektion möglich (man spricht daher auch von einem „Convection Permitting System“). Das reicht

<sup>1</sup> Wurde mittlerweile durch ICON abgelöst.

<sup>2</sup> Wurde 2015 durch ICON-EU abgelöst.

```

1 Bericht für das Sächsische Landesamt für Umwelt und Geologie,
2 ausgegeben vom Deutschen Wetterdienst Leipzig am
3 Montag, 09.01.2012, um 07 Uhr
4
5 Risikoabschätzung für Starkregen über 100 Liter/Quadratmeter innerhalb eines
6 Zeitraumes von 24 Stunden bis Donnerstag früh:
7 Ein Überschreiten der 100-mm-Schwelle ist nicht wahrscheinlich.
8
9 Quantilanzug Sachsen
10 FLUSS ASGBTG ZEIT ITRVL 090 050 010
11 NE-L3 090112 0600 06-12 000 000 000
12 ..... 12-18 000 000 000
13 ..... 18-06 005 006 007
14 ..... 06-18 000 000 000
15
16
17 FLUSS ASGBTG ZEIT ITRVL 090 050 010
18 NE-R3 090112 0600 06-12 000 000 000
19 ..... 12-18 000 000 000
20 ..... 18-06 005 008 010
21 ..... 06-18 000 000 000
22
23
24 FLUSS ASGBTG ZEIT ITRVL 090 050 010
25 NE-U3 090112 0600 06-12 000 000 000
26 ..... 12-18 000 000 000
27 ..... 18-06 005 006 007
28 ..... 06-18 000 000 000
29
30
31 FLUSS ASGBTG ZEIT ITRVL 090 050 010
32 NE-U2 090112 0600 06-12 000 000 000
33 ..... 12-18 000 005 006
34 ..... 18-06 000 005 006
35 ..... 06-18 000 000 000
36
37
length: 5120 lines: 170 Ln: 1 Col: 1 Sel: 0|0 DosWindows UCS-2 Big Endian JNS

```

Abbildung 6.2.3: Beispielhafter Aufbau einer Quantilvorhersage der RWB Leipzig.

aus, um beispielsweise die prinzipielle Bereitschaft der Atmosphäre zu simulieren, Gewitterzellen auszubilden. Allerdings kann auch mit einer vergleichsweise hohen Gitterauflösung die exakte Genese und Zugbahn solcher Gebilde nicht nachvollzogen werden. Im Umkehrschluss macht dies wiederum eine deterministische Hochwasservorhersage für kleine, schnell reagierende Einzugsgebiete bei konvektiven Lagen sehr schwierig. Dieser Befund wird sich in gewisser Weise in den Ergebnissen der hierin vorgestellten Analysen widerspiegeln.

Für die Abfluss- und Hochwasservorhersage von übergeordneter Bedeutung sind die Niederschlagsfelder aus dem COSMO-DE-Modelloutput; die Outputfelder werden aller drei Stunden bereitgestellt. Die zeitliche Auflösung des Outputs beträgt eine Stunde. Als solches gehen die COSMO-DE-Felder – neben anderen – auch direkt in die LHWZ-Hochwasservorhersagemodelle ein. Zukünftig geplant ist die Einbeziehung des COSMO-DE-Ensemble-Produkts (operationell seit Mai 2012; derzeit 20 plus 1, in Zukunft 40 plus 1 Ensemble-Member geplant).

Für die hierin dargestellten Analysen wurden aus COSMO-DE die Felder „flüssiger Niederschlag“ sowie „fester Niederschlag; Schnee und Graupel“ aufsummiert, welche die simulierten Stundensummen des Niederschlags

von  $t = 1$  h bis 27 h für die Vorhersagezeitpunkte 00:00, 06:00, 12:00 und 18:00 UTC bzw. bis 21 h für 03:00, 09:00, 15:00 und 21:00 UTC enthalten. Das LHWZ Sachsen bezog diese Daten bis 2015 als gezippte ASCII-Grids; mittlerweile ist die Versorgung auf das binäre GRIB2-Format umgestellt (Abschluss der Arbeiten war Ende 2014).

Wie bei Atmosphärenmodellen üblich werden auch bei COSMO-DE geographische Koordinaten für die horizontale räumliche Diskretisierung des Modellgebiets verwendet (also ein sphärisches Gitter). Die hier vorgestellten weiteren Auswertungen verlangen die Konvertierung und Transformation der an den COSMO-Gitterpunkten vorliegenden Modellergebnisse auf ein kartesisches (orthogonales) Gitter; konkret wird als gemeinsamer Lagebezug das Gauß-Krüger-System verwendet. Dazu sind geographische Transformationen notwendig (siehe dazu Abschnitt 6.3.1). Im Übrigen finden sich weitere Details zu COSMO-DE in BALDAUF ET AL. (2009). Eine detaillierte Verifikation von COSMO-basierten Niederschlagsvorhersagen ist beispielsweise in PAULAT (2007) beschrieben.

## 6.2.4 QPEs und QPFs basierend auf Radarmessungen

Ganz generell ist – gerade für konvektiv geprägte Lagen – die Einbeziehung von Radar-Daten in eine Untersuchung wie die vorliegende interessant (siehe z. B. EHRET ET AL., 2008). Es ist davon auszugehen, dass insbesondere für sommerliche Starkregenereignisse das stationäre Ombrometermessnetz nicht ausreichend dicht ist, um die raumzeitliche Variabilität des Niederschlagsfeldes für mesoskalige Einzugsgebiete (von wenigen bis zu wenigen hundert Quadratkilometern) hinreichend genau zu erfassen. Radar stellt in diesem Zusammenhang ein geeignetes Verfahren zur Gewinnung von Rohdaten zur Niederschlagsquantifizierung dar. Neben dem RADOLAN-Komposit-QPE existiert das vom DWD entwickelte Kurzzeit-Vorhersageprodukt RADVOR-OP. Hierbei soll der Sprung von einem QPE zu einer QPF mit Hilfe von Trackingverfahren erreicht werden. Derzeit ist es damit möglich einen Vorhersagezeitraum von zwei Stunden abzudecken.

Im Rahmen dieser Studie wurde das an Stationsdaten angeeichte RADOLAN-RW-Komposit in die Verifikation einbezogen (siehe Abbildung 6.2.5). Die stündlich aktualisierten Niederschlagssummen werden in einer räumlichen Auflösung von 1 km x 1 km im binären RADOLAN-Format ausgegeben. Die Niederschlagsfelder sind polar-

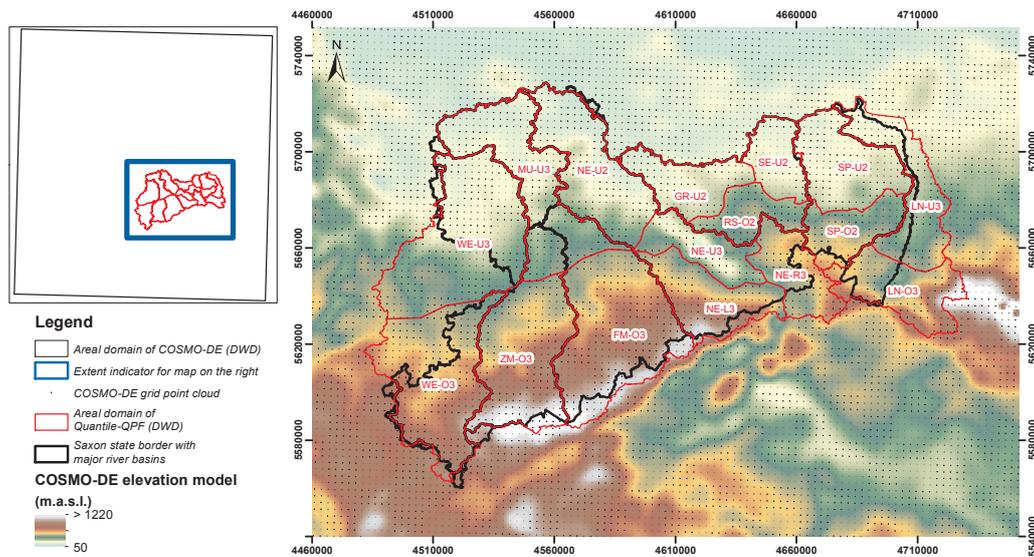


Abbildung 6.2.4: COSMO-Koordinatengitter und Untersuchungsdomäne inklusive Flussgebietsgrenzen. Gemeinsames Bezugssystem: Gauß-Krüger, Zone 4 (EPSG-Code 31468).

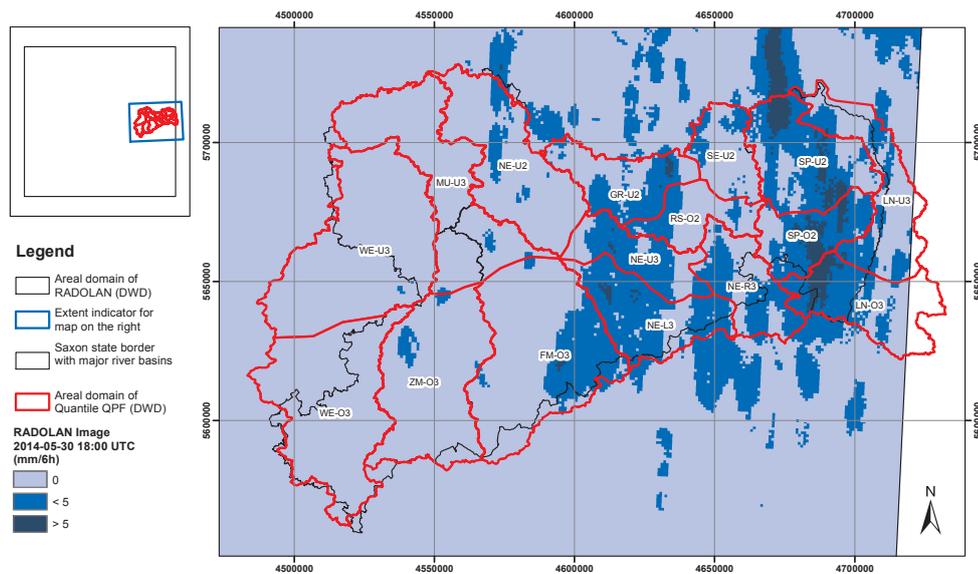


Abbildung 6.2.5: RADOLAN-Komposit und Untersuchungsdomäne inklusive Flussgebietsgrenzen. Gemeinsames Bezugssystem: Gauß-Krüger, Zone 4 (EPSG-Code 31468).

stereographisch projiziert und müssen zunächst konvertiert und transformiert werden. Zur Vereinfachung werden die geographischen Koordinaten der Zellmittelpunkte durch den DWD veröffentlicht, die für die weitere Verarbeitung in das Gauß-Krüger-System überführt wurden. Das RADOLAN-Komposit deckt in seiner räumlichen Ausdehnung die Hauptflussgebiete Sachsens nur unvollständig ab. Die östlichen Teile des Einzugsgebietes der Lausitzer Neiße werden nicht erfasst, weshalb die dort ermittelten

mittleren sechsständigen Gebietsniederschläge nur mit Vorsicht interpretiert werden sollten. Das Vorhersageprodukt RADVOR-OP wird derzeit am Landeshochwasserzentrum Sachsen nicht genutzt und wurde auch nicht verifiziert. Für weitere Verifikationsergebnisse der RADOLAN-Produkte für Sachsen sei auf KRONENBERG (2014) verwiesen. Eine umfassende RADVOR-OP-Verifikationsstudie liegt ebenfalls vor mit DWD (2012). Darin zeigte sich, dass RADVOR-

OP im Mittel schlechter als die NWP (COSMO-DE) verifizierte.

## 6.3 Verifikation der Vorhersageprodukte

In diesem Abschnitt werden die Methodik (siehe Abschnitte 6.3.1 und 6.3.2) sowie Ergebnisse (Abschnitt 6.3.3) der Verifikation vorgestellt.

### 6.3.1 Grundsätzliches zur Gewinnung der Vergleichsdaten

Im Folgenden wird die für die Gewinnung der Vergleichsdaten angewendete Methodik grundlegend erläutert. Dabei geht es in erster Linie um die raum-zeitliche Aggregation der in unterschiedlicher Auflösung vorliegenden Daten.

#### Bildung von Gebietsmitteln aus Ombrometerdaten und COSMO-DE-/RADOLAN-Rastern

Wie bereits ausgeführt, wird die Untersuchung räumlich mit Bezug zu den für die DWD-Quantilvorhersage gültigen 16 Teilgebieten durchgeführt (Tabelle 6.1.1). Dabei sind sowohl die punktuell vorhandenen Ombrometerdaten als auch die gerasterten COSMO-DE- und RADOLAN-Daten entsprechend zu behandeln. Die Ombrometerdaten wurden mittels Ordinary Kriging zeitschrittweise (6-h-Summen) auf eine räumliche horizontale Auflösung von 1 km interpoliert. Fehlten an Stationen Werte (siehe Tabelle 6.2.1), blieben diese beim Kriging unberücksichtigt. Die Gebietsmittelbildung erfolgte dann durch anteilige Wichtung der Zellwerte im Hinblick auf ihren spezifischen Teilgebietsanteil entsprechend einer vorher definierten Teilgebietsmaske. Im Falle des Vergleichs von Ombrometerdaten mit der Quantilvorhersage wurden die Gebietsmittel zusätzlich angepasst und Niederschlagssummen kleiner/gleich 4,4 mm in 6 h auf null gesetzt (vgl. dazu Abschnitt 6.2.2).

Die Koordinaten der COSMO-DE-Zellmittelpunkte wurden zunächst in das orthogonale (kartesische) Gauß-Krüger-System überführt. Die in einer horizontalen Auflösung von ca. 2,8 km vorliegenden COSMO-Niederschläge wurden dann für das Untersuchungsgebiet (blauer Kasten in Abbildung 6.2.4) mittels linearer Interpolation auf eine 1-km-Auflösung umgerechnet. Die Gebietsmittelbildung erfolgte nach gleichem Prinzip wie im Falle der interpolier-

ten Ombrometerdaten. Die auf 6-h-Summen aggregierten RADOLAN-Niederschlagsfelder wurden ebenfalls in das Gauß-Krüger-System überführt und auf die im Kilometerabstand aufgelöste Teilgebietsmaske linear interpoliert. Auf Grundlage der Teilgebietsmaske wurden dann wiederum die Gebietsmittel berechnet.

#### Zeitliche Aggregation

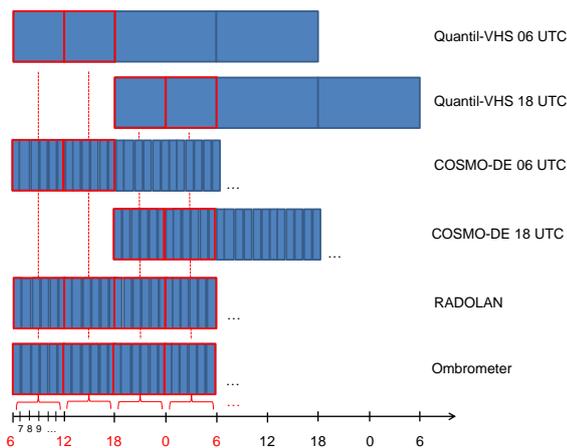
Der Gesamtzeitraum 04/2011 bis einschließlich 06/2014 wurde aufgrund einer in 2011 erfolgten Überarbeitung der Gebietszuschnitte der Quantilvorhersage gewählt. Die angepassten Teilgebiete sind im April 2011 eingeführt worden, weshalb dies als Beginn des Untersuchungszeitraumes definiert wurde. Die untersuchten quantitativen Niederschlagsvorhersagen und -schätzungen weisen unterschiedliche Vorhersagezeiträume und Aktualisierungsintervalle sowie Vorhersagezeitpunkte auf. Für einen quantitativen Vergleich muss ein gemeinsamer zeitlicher Bezug gefunden werden. Alle Daten wurden auf 6-h-Intervalle für die Zeiträume 06:00–12:00, 12:00–18:00, 18:00–00:00 sowie 00:00–06:00 UTC zeitlich aggregiert (siehe Abbildung 6.3.1). Dabei entspricht die Fensterbreite von sechs Stunden der Auflösung der Quantil-Vorhersage (als kleinste gemeinsame Auflösung).

Für saisonale Betrachtungen wurden die untersuchten Produkte jahreszeitlich zusammengefasst. Aufgrund des Untersuchungszeitraums ergeben sich bei den Quartalen März-April-Mai und Juni-Juli-August folgende Verschiebungen: Während im Frühlingsquartal (MAM) der März 2011 fehlt, sind im Sommerquartal (JJA) die Monate Juli und August 2014 nicht enthalten; diese Verschiebungen wurden jedoch zugelassen.

#### Umgang mit fehlenden Werten in den Vorhersageprodukten

Generell können in den untersuchten Daten Fehlwerte (im Sinne komplett fehlender Informationen für einen oder mehrere Zeitschritte) auftreten. Mit Fehlwerten oder Datenlücken wurde wie folgt verfahren:

- Fehlwerte in den Ombrometerdaten wurden durch räumliche Interpolation unter Nutzung von Daten von Nachbarstationen ergänzt.
- Fehlwerte in den COSMO-DE-Feldern können beispielsweise durch ausbleibende Datenlieferungen zustande kommen. Es kann also vorkommen, dass das



**Abbildung 6.3.1:** Unterschiedliche zeitliche Diskretisierung der verschiedenen DWD-Produkte. Zum weiteren Vergleich mit der Quantilvorhersage werden die Zeitreihen aller weiteren Produkte auf 6-h-Intervalle aggregiert (siehe rote Rahmen).

komplette Vorhersagefeld für einen bestimmten Vorhersagezeitpunkt fehlt. Für diesen Fall wurden räumlich interpolierte Stationswerte als „Best Guess“ ergänzt. Insgesamt waren im Mittel für 264 (6 %) Zeitschritte diese Ergänzungen notwendig, wobei bei etwa einem Drittel der Zeitschritte die Ombrometermessungen keinen Niederschlag auswiesen. Ein gleichzeitiges Fehlen von Daten aus der NWP und Ombrometerdaten kam nicht vor.

- ▶ Fehlwerte in den Quantilvorhersagen können zum einen durch fehlende Datenlieferungen zustande kommen, zum anderen durch sporadisch aufgetretene Probleme bei der Übernahme in die LHWZ-Langzeitdatenbank verursacht worden sein, aus der sie für die vorliegende Untersuchung extrahiert wurden. Zu diesen Terminen wurden ebenfalls interpolierte Stationsdaten als 50 %-Quantil ergänzt und das 10 %- und das 90 %-Quantil durch Stationswerte plus/minus eine Standardabweichung angenähert. Insgesamt traten im Mittel 38 (0,8 %) Zeitschritte im Untersuchungszeitraum auf, zu denen keine Quantilvorhersagen vorlagen. Davon zeigten Ombrometerdaten bei ca. zwei Dritteln aller Fälle keinen Niederschlag.
- ▶ Fehlwerte im RADOLAN-Produkt können durch fehlende Datenlieferungen oder durch Messausfälle bzw. Artefakte entstehen. Tests zeigten, dass Messausfälle vor allem durch den Ausfall eines Radarstandortes bedingt sind. Artefakte sind meist durch Fehler im An-

eichungsprozess bedingt. Entsprechende Zeitschritte wurden mit interpolierten Stationsdaten ersetzt und als „Best Guess“ geschätzt. Fehlstellen traten im Untersuchungszeitraum in 86 (1,3 %) Fällen auf, wovon die Ombrometerdaten in ca. der Hälfte aller Fälle keinen Niederschlag zeigten.

Bei den in Abschnitt 6.3.2 vorgestellten Methoden der Verifikation wurden Fehlwerte teilweise von der Betrachtung ausgeschlossen um Falschinterpretationen zu vermeiden. War dies aus methodischen Gründen nicht möglich (z. B. bei ungleich langen Zeitreihen), so werden im Folgenden die betreffenden Zeitschritte entsprechend farbig markiert (z. B. grau hinterlegt).

### 6.3.2 Methoden und Werkzeuge des Vergleichs

Im Rahmen einer Joint Working Group wurden von BROWN ET AL. (2004) Empfehlungen für die Verifikation von aus operationellen numerischen Wettervorhersagemodellen abgeleiteten quantitativen Niederschlagsvorhersagen erarbeitet. Für den hier vorgestellten Vergleich von QPFs werden einige der empfohlenen Methoden angewendet. Als einfache diagnostische Werkzeuge empfehlen die Autoren zunächst grafische Darstellungen, um einen grundlegenden Eindruck über den Datensatz und etwaige Tendenzen zu erhalten. Hier spricht man von *qualitativer Verifikation*. Dazu gehören zum Beispiel kartografische Darstellungen der relativen Überschreitungshäufigkeit eines bestimmten Schwellenwertes, Streudiagramme oder Quantil-Quantil-Plots zur Visualisierung von Unterschieden bzw. Gemeinsamkeiten in der Häufigkeitsverteilung zwischen beobachteten und vorhergesagten Werten (siehe Abschnitt 6.3.3). Ein weiteres Werkzeug können Summenlinien sein.

Weiterhin erlauben *quantitative Verifikationsmaße* einen detaillierteren Einblick in die Güte der QPFs (siehe umfassende Darstellung in Abschnitt 2.4). Generell kann die Niederschlagsvorhersage entweder als kontinuierliche Variable oder als kategorielles Ereignis mit entsprechend unterschiedlichen Methoden verifiziert werden. Wird beispielsweise die Niederschlagsmenge als kontinuierliche Veränderliche aufgefasst, so kann unter anderem die auf die Beobachtung hin normalisierte Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (nRMSE) als Verifikationsmaß dienen. Die Normalisierung erfolgt hierbei auf die Bandbreite der beobachteten Niederschlagsmenge und soll der besse-

ren Einordnung des Fehlermaßes dienen. Die kategorielle Verifikation von QPFs erfolgt meist grenzwertbasiert. Eine in diesem Zusammenhang sehr häufig genutzte Methode ist der Vergleich auf Basis einer Kontingenztafel (siehe Abb. 2.4.1) mit anschließender, darauf aufbauender Berechnung verschiedener Verifikationsmaße („Scores“). Da es sich bei dem RADOLAN-Produkt um ein QPE handelt, wurde dafür auf die Berechnung quantitativer Verifikationsmaße verzichtet. Für die Vorhersageprodukte hingegen wurden sowohl qualitative Darstellungen, als auch quantitative Verifikationsmaße ermittelt.

Die Grenzwerte für die in diesem Kapitel vorgestellte Verifikationsstudie sind mittlere Gebietsniederschläge von [0,1; 1; 2; 5; 10; 15; 20; 25; 30] mm in 6 h. Der Schwellenwert von 0,1 mm in 6 h resultiert aus dem Wunsch der Bewertung sehr kleiner, interpolationsbedingter Werte in der Beobachtung, als auch in den COSMO-DE Feldern. Zum Beispiel befinden sich im Falle der Beobachtung im Mittel ein Drittel und im Falle von COSMO-DE im Mittel etwa ein Viertel aller Werte in der Klasse 0 bis 0,1 mm. Die benannten Schwellenwerte wurden ebenfalls für die Erstellung der bereits erwähnten Karten der relativen Überschreitungswahrscheinlichkeiten angesetzt. Mit Ausnahme der Summenlinien wurden alle Verifikationsmethoden jeweils für den Gesamtzeitraum 04/2011 bis einschließlich 06/2014 und jahreszeitlich getrennt (Monatsscheiben MAM, JJA, SON, DJF) angewendet. Damit sollen etwaige jahreszeitliche Unterschiede in den Ergebnissen herausgestellt werden.

### 6.3.3 Ergebnisse

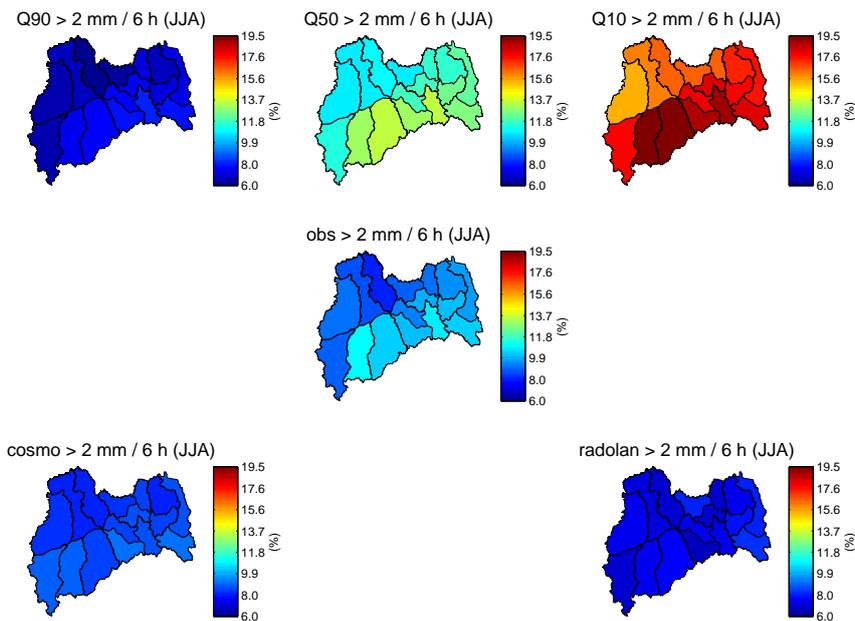
Die verschiedenen Vorhersageprodukte wurden wie in Abschnitt 6.3.1 beschrieben in ihrer raum-zeitlichen Auflösung angepasst und nach den in Abschnitt 2.4 dargestellten Methoden analysiert. Zur besseren Verständlichkeit sollen an dieser Stelle die einheitlich genutzten Abkürzungen und Termini vorgestellt werden. Generell wird mit den Begriffen „Beobachtung/Messung“ oder „obs“ auf die aus Stationsdaten interpolierten mittleren sechsstündigen Gebietsniederschlagssummen verwiesen. Mit dem Begriff „QPF“ oder den jeweiligen Abkürzungen werden die untersuchten Vorhersageprodukte des DWD benannt. Dabei werden die einzelnen Perzentile der Quantilvorhersage mit „Q90“, „Q50“ und „Q10“ entsprechend ihrer Überschreitungswahrscheinlichkeit (in Prozent) abgekürzt.

Das Vorhersageprodukt COSMO-DE wird mit „cosmo“ angesprochen; das RADOLAN-RW-Komposit wird als „radolan“ bezeichnet. Es ist zu beachten, dass es sich bei den untersuchten Produkten um QPFs (Quantilvorhersagen und COSMO-DE-Vorhersagen) und QPEs (RADOLAN-Felder) handelt. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist stets auf den Unterschied zwischen den Produkten zu achten. Es werden im Folgenden nur ausgewählte Ergebnisse dargestellt und besprochen. Der ausführliche Anhang von KERL & PHILIPP (2015) enthält alle im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchung gewonnenen Ergebnisse.

#### Karten der relativen Häufigkeit der Überschreitung bestimmter Schwellenwerte

Die beispielhaft in Abbildung 6.3.2 dargestellten Karten der relativen Überschreitungshäufigkeit bestimmter Schwellenwerte dienen einem ersten überblicksmäßigen Vergleich der betrachteten Produkte. Generell ist diese Methode von den übrigen deutlich abzugrenzen, da hier kein zeitabhängiger Vergleich zwischen Vorhersageprodukt und Messung erfolgt. Dabei werden die innerhalb der Zeiträume beobachteten Schwellenwertüberschreitungen – unabhängig von ihrem zeitlichen Auftreten – relativ zu der Gesamtanzahl der Zeitschritte ermittelt. Im vorliegenden Fall wurde auf den Ausschluss von Fehlwerten verzichtet, da diese einen zu vernachlässigenden Anteil an der gesamten Zeitreihe ausmachen (siehe Abschnitt 6.3.1).

In der Mitte der Abbildung 6.3.2 sind jeweils die relativen Häufigkeiten der Überschreitung des betrachteten Schwellenwertes für die interpolierten Stationsdaten dargestellt, umliegend – zum Vergleich – die Häufigkeiten für die Vorhersageprodukte. Die Farbskala wurde zur besseren Vergleichbarkeit entsprechend des Minimums und Maximums aller Häufigkeiten angepasst. In der Abbildung ist die relative Häufigkeit von beobachteten 2 mm Niederschlag in 6 h in den Sommermonaten (Juni, Juli, August – JJA) zu sehen. Die Beobachtung (obs) zeigt, dass es Unterschiede in den Häufigkeiten zwischen den einzelnen Vorhersagegebieten gibt. Der Häufigkeitsbereich erstreckt sich zwischen etwa 6 % im Vorhersagegebiet NE-U2 und etwa 10 % im Vorhersagegebiet ZM-O3 (jeweils bezogen auf alle 6-h-Werte im Betrachtungszeitraum und den Schwellenwert von 2 mm). Vergleicht man die Karten für die Beobachtung mit denen der Vorhersageprodukte, so sind ähnliche räumliche Muster zu erkennen.



**Abbildung 6.3.2:** Relative Häufigkeit der Überschreitung von 2 mm in 6 h im Sommerquartal (Monate JJA) für QPFs Quantilvorhersage und COSMO-DE sowie das Radar-QPE RADOLAN und das QPE aus interpolierten Stationsdaten.

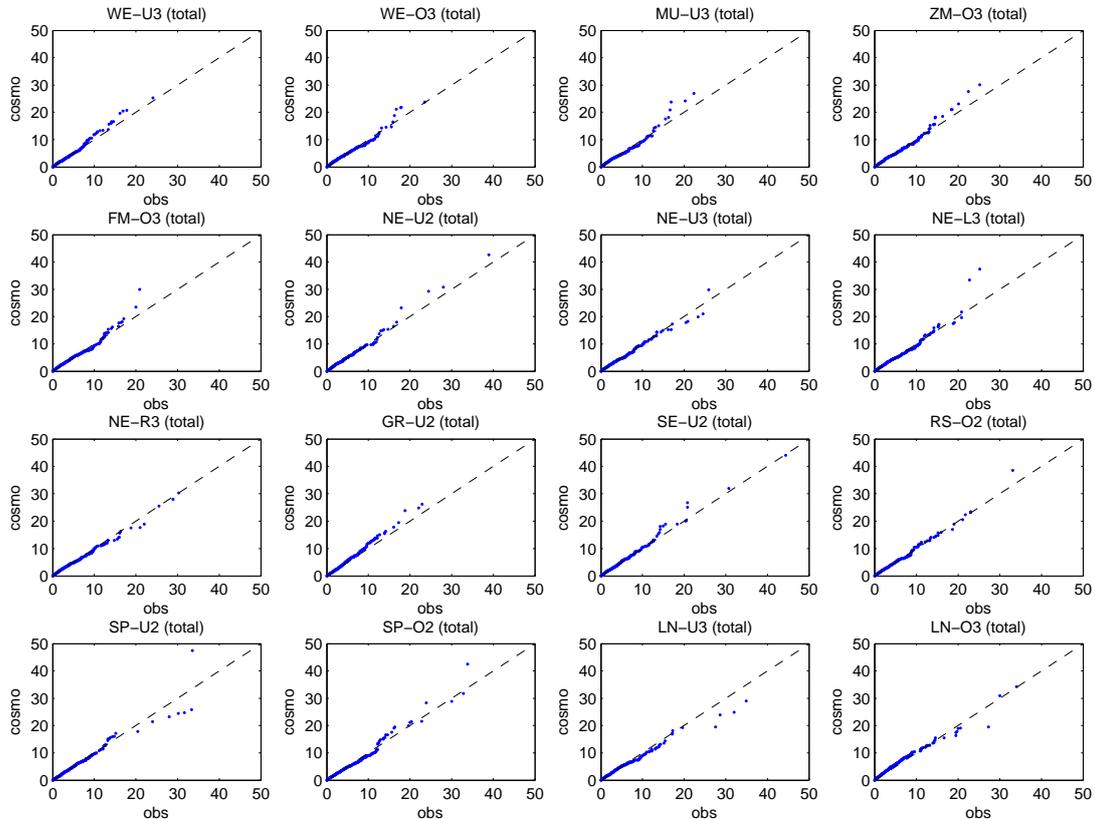
Im Falle der Quantilvorhersage zeichnet sich ein systematischer Unterschied zwischen den einzelnen Quantilen ab. Während die relativen Häufigkeiten des 90er-Perzentils relativ nahe an der Messung liegen, so liegen die des 50er-Perzentils geringfügig und die Häufigkeiten des 10er-Perzentils deutlich oberhalb der beobachteten Häufigkeiten. COSMO-DE hingegen weist im Mittel geringfügig kleinere relative Häufigkeiten auf. Die relativen Häufigkeiten des RADOLAN-Produktes liegen ebenfalls unterhalb der beobachteten relativen Häufigkeiten. Es ist darauf hinzuweisen, dass die relativen Häufigkeiten der Quantilvorhersagen bei Schwellenwerten von  $[0,1; 1; 2]$  mm in 6 h gleichbleibend sind, da Quantilvorhersagen unterhalb von 4,4 mm in 6 h per Konvention des Produkts als „kein Niederschlag“ definiert sind. Weitere analoge Abbildungen befinden sich im Anhang von KERL & PHILIPP (2015).

### Quantil-Quantil-Plots und Streudiagramme zwischen beobachteten und vorhergesagten Werten

Eine Möglichkeit die Häufigkeitsverteilungen von Beobachtung und Vorhersage zu vergleichen sind Quantil-Quantil-Plots (Q-Q-Plots). Hier werden, wie auch im Falle der Häufigkeitskarten, die Daten von ihrem zeitlichen Auftreten losgelöst betrachtet. Dazu werden die sortierten beobach-

teten (Abszisse) gegen die sortierten vorhergesagten Werte (Ordinate) der Gebietsmittel im Betrachtungszeitraum aufgetragen. Mittels Q-Q-Plots können folglich die Häufigkeitsverteilungen der betrachteten Größen auf ihre Ähnlichkeit hin überprüft werden. Exemplarisch ist eine solche Abbildung für das COSMO-DE-Produkt vs. Stationsdaten im Gesamtzeitraum dargestellt (Abb. 6.3.3). Hier zeigt sich eine allgemein gute Übereinstimmung der beobachteten Quantile mit den COSMO-DE-Quantilen. Lediglich in den oberen Quantilen (Niederschlag größer 15 mm in 6 h) zeigen sich Abweichungen mit leichter – je nach Flussgebiet unterschiedlicher – zufälliger Über- oder Unterschätzung der COSMO-DE-Quantile. Weitere Q-Q-Plots (z. B. jahreszeitliche) finden sich im Anhang von KERL & PHILIPP (2015).

Entgegen der Q-Q-Plots dienen Streudiagramme dem zeitabhängigen Vergleich von Messung und Vorhersageprodukt. Im Streudiagramm wird für jeden Zeitschritt der beobachtete (Abszisse) gegen den vorhergesagten (Ordinate) Wert aufgetragen. Abbildung 6.3.4 zeigt die Streudiagramme aller Vorhersagegebiete exemplarisch für das 10er-Perzentil der Quantilvorhersage-QPF in den Monaten Juni, Juli und August. Das Fehlen von Datenpunkten im Bereich 0–4,4 mm resultiert aus der Korrektur der interpolierten Ombrometerdaten (gemäß Abschnitt 6.3.1). Aufgrund



**Abbildung 6.3.3:** Q-Q-Plot für das Vorhersageprodukt COSMO-DE vs. Stationsdaten (6-h-Summen) in allen Vorhersagegebieten im Gesamtzeitraum (04/2011–06/2014).

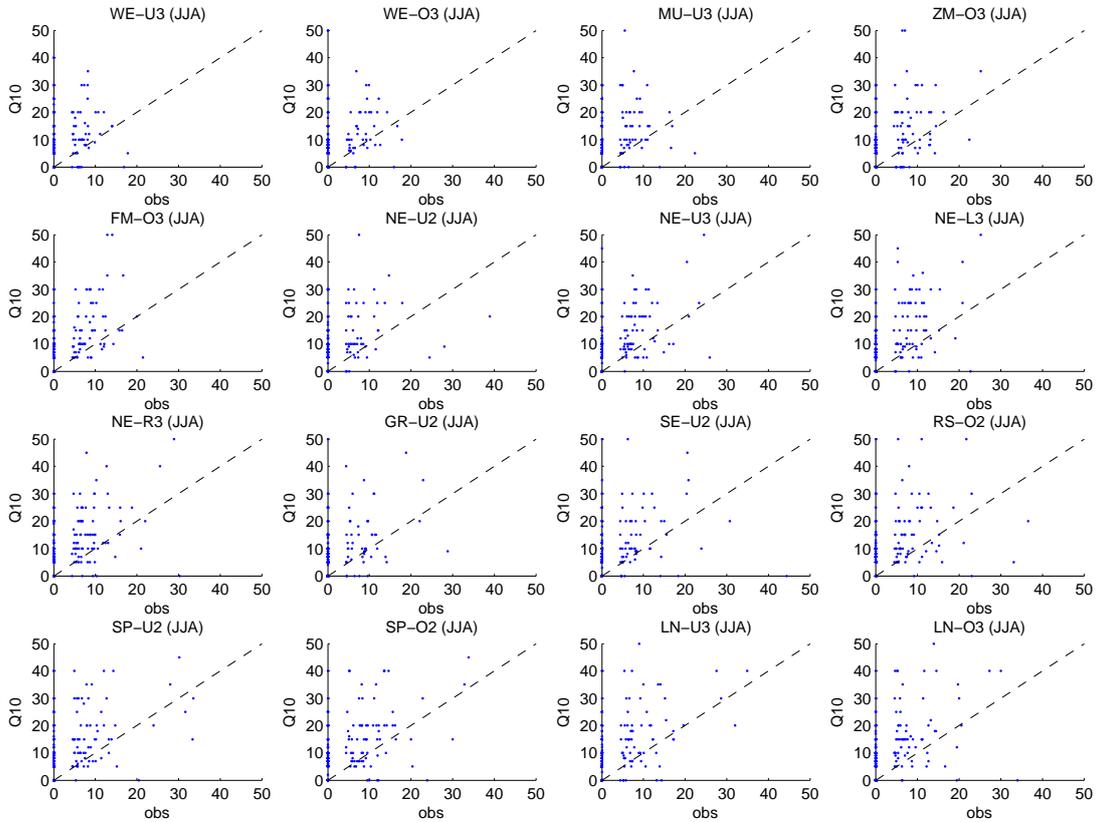
der intervallskalierten Variable der Quantilvorhersagen sind in den Streudiagrammen bänderartige Strukturen zu erkennen. Ein Quantilwert von beispielsweise 5 mm repräsentiert ein Intervall von 4,5–5,4 mm.

Die Streudiagramme zwischen Quantilvorhersage und Messung lassen erkennen, dass dieses Vorhersageprodukt hauptsächlich in 5-mm-Schritten ausgegeben wird. Nur wenige Werte decken sich nicht mit dieser Schrittweite. Generell zeigen sich deutliche Abweichungen zwischen den Vorhersagen für das 10er-Perzentil und der Messung, mit allgemein überschätzender Tendenz. Vergleicht man die drei Perzentile der Quantilvorhersage, so zeigt sich hier das bereits besprochene Verhalten, also, dass die Vorhersagen des 90er-Perzentils der Beobachtung am ähnlichsten sind, gefolgt vom 50er- und 10er-Perzentil (Abbildungen dazu im Anhang von KERL & PHILIPP, 2015). Zwischen den einzelnen Vorhersagegebieten sind keine markanten Unterschiede hervorzuheben.

In Abbildung 6.3.5 sind beispielhaft die Streudiagramme von COSMO-DE gegen Stationsdaten für den Gesamtzeitraum (über alle Monate) dargestellt. Die im Vergleich zu den Quantilvorhersagen höhere Anzahl an Datenpunkten liegt in der fehlenden Notwendigkeit von Korrekturen der Beobachtung begründet (siehe Abschnitt 6.3.1). Im Allgemeinen ist ein deutlicher Zusammenhang zwischen vorhergesagten und beobachteten Niederschlagssummen zu erkennen. Im Mittel scheinen sich die über- bzw. unterschätzenden Tendenzen des COSMO-DE-Produktes auszugleichen. Weitere Scatterplots (z. B. für quartalsweise Auswertungen) finden sich im Anhang von KERL & PHILIPP (2015).

### Summenlinien

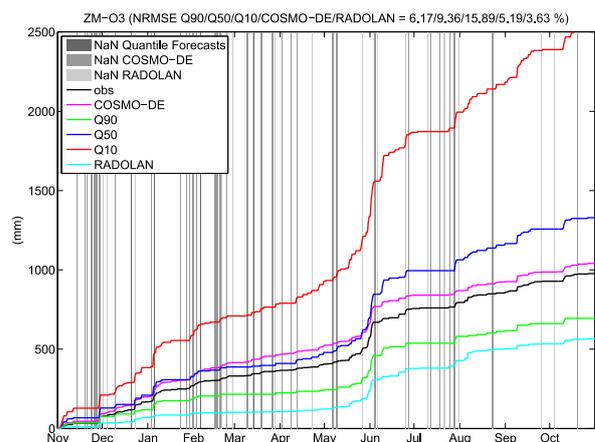
Zur Ermittlung der zeitlichen Ähnlichkeit zwischen vorhergesagten Niederschlagshöhen und der Beobachtung wurden für jedes Vorhersagegebiet für den Zeitraum 04/2011 bis



**Abbildung 6.3.4:** Streudiagramm des 10%-Quantils der Quantilvorhersage vs. Stationsdaten (6-h-Summen) im Sommerquartal (Monate JJA; Zeitraum 04/2011–06/2014).

einschließlich 06/2014 Summenlinien erstellt. Zum einen können damit klimatologische Unterschiede ermittelt werden (Jahressummen) und zum anderen können Zeiträume erfasst werden, in welchen die Vorhersageprodukte stark von der Messung abweichen (keine Parallelität zwischen den Summenlinien). In Abbildung 6.3.6 sind beispielhaft die Summenlinien für das Vorhersagegebiet Zwickauer Mulde oberhalb 300 m ü. NN für das hydrologische Jahr 2013 dargestellt. Grau hinterlegt sind durch Messdaten aufgefüllte Datenlücken in den QPFs bzw. dem Radar-QPE RADOLAN (vgl. Abschnitt 6.3.1).

Der nRMSE der Vorhersageprodukte beträgt für das 90/50/10er-Perzentil 6/9/16% und für das COSMO-DE-Produkt 5% der gemessenen Bandbreite der Gebietsniederschläge. Der nRMSE des RADOLAN-QPE beträgt 4% (alle Werte jeweils in der Kopfzeile der Summenlinien-Plots aufgeführt). Die Verteilung der nRMSE der DWD-Produkte in allen Vorhersagegebieten (jeweils für den Gesamtzeitraum) ist in Abbildung 6.3.7 dargestellt. Der Median der



**Abbildung 6.3.6:** Summenlinien des Vorhersagegebietes Zwickauer Mulde oberhalb 300 m ü. NN für das hydrologische Jahr 2013. Zeiträume mit Fehlwerten sind grau hinterlegt (siehe Abschnitt 6.3.1).

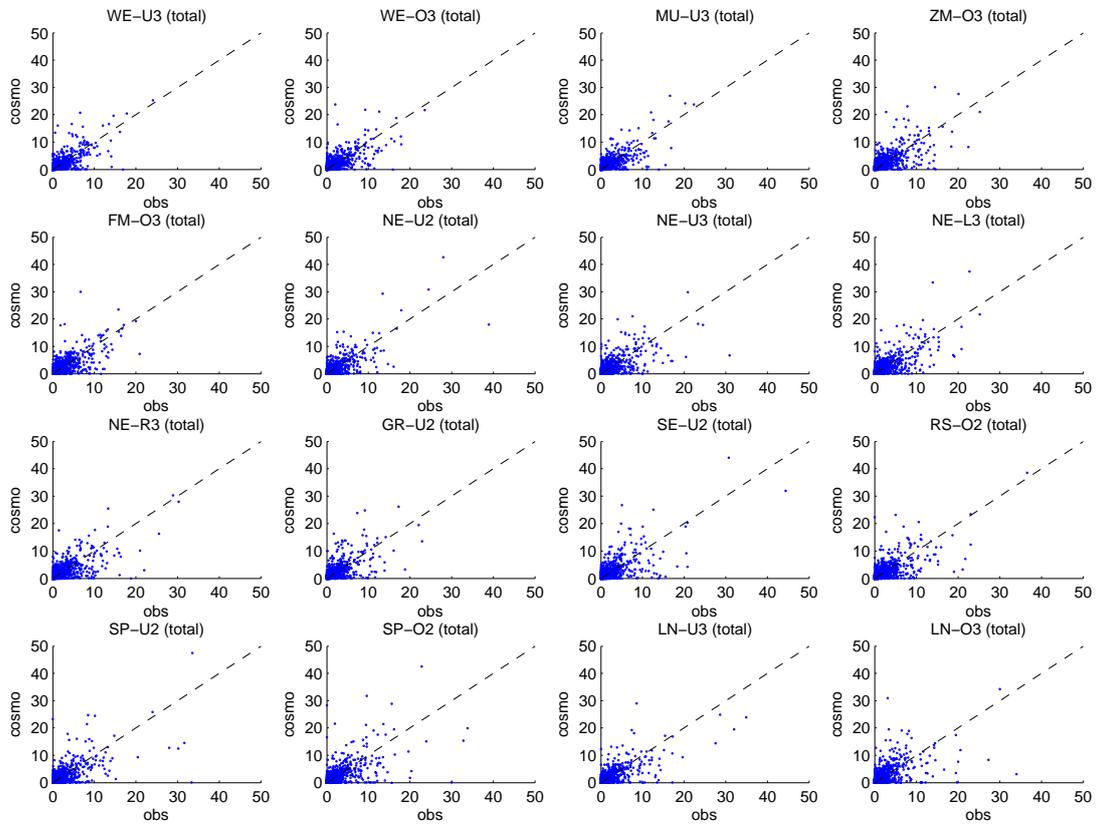


Abbildung 6.3.5: Streudiagramm der COSMO-DE-QPF vs. Stationsdaten (6-h-Summen) im Gesamtzeitraum (04/2011–06/2014).

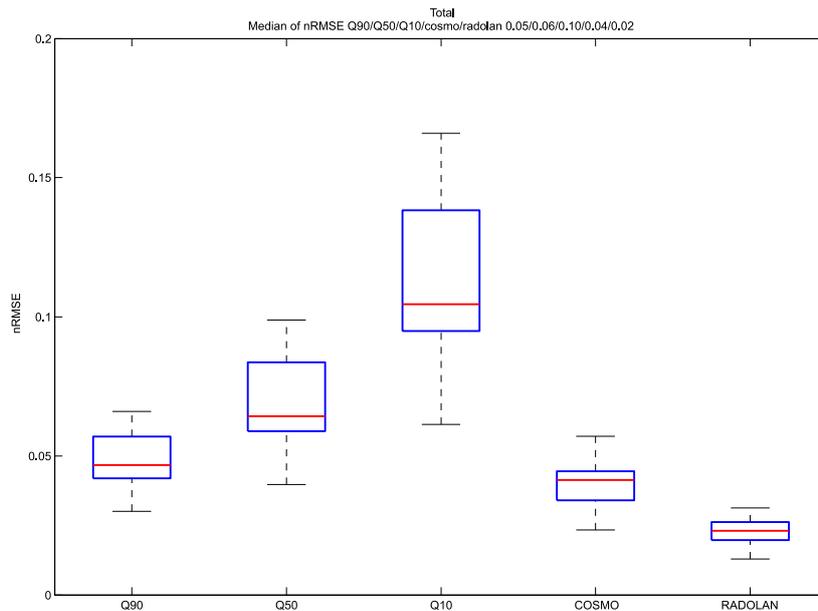


Abbildung 6.3.7: Boxplots des nRMSE für 6-h-Summen unterschiedlicher QPF/QPE-Produkte vs. Beobachtung über alle Vorhersagegebiete im Gesamtzeitraum (04/2011–06/2014).

Abweichungen der durch COSMO-DE vorhergesagten Gebietsmittel beträgt 4 % gegenüber Gebietsniederschlägen aus Stationsdaten. Die übrigen Vorhersageprodukte folgen mit [5; 6; 10] % (90er-Perzentil/50er-Perzentil/10er-Perzentil). Das RADOLAN-QPE verifiziert mit einem Median des nRMSE von 2 % und geringer Spannweite nebst geringem Interquartilabstand am besten. Unter den Vorhersageprodukten weisen das 90er-Perzentil und COSMO-DE die geringsten Interquartilabstände und Spannweiten auf.

Die beobachtete Niederschlagssumme des hydrologische Jahres 2013 beträgt für das Gebiet ZM-O3 in etwa 1.000 mm (siehe Abbildung 6.3.6). Diese Summe wird am besten durch die COSMO-DE-Vorhersage angenähert, das 50er-Perzentil der Quantilvorhersage überschätzt mit ca. 1.400 mm um rund 40 %. Während sich die 90er- und 50er-Perzentile noch innerhalb einer Schwankungsbreite bezüglich der Stationsdaten von  $\pm 500$  mm bewegen, überschätzt das 10er-Perzentil die beobachtete Jahressumme um mehr als 1.500 mm (rund Faktor 2,5). Das RADOLAN-Produkt hingegen unterschätzt die beobachtete Jahressumme 2013 um etwa 40 %. Ende Mai ist ein steiler Anstieg aller Summenlinie zu verzeichnen. Diese Starkregenereignisse waren in diesem und anderen Vorhersagegebieten für das Großschadensereignis 2013 verantwortlich (LFULG, 2015). Die Summenlinien aller Vorhersageprodukte steigen parallel zu der Summenlinie der Messung an, variieren jedoch in der Höhe des Anstiegs (siehe Abbildungen im Anhang von KERL & PHILIPP, 2015). RADOLAN fällt durch den geringsten Zuwachs auf. Weitere Untersuchung des Ereignisses 2013 finden sich in Abschnitt 6.3.4. Im Anhang von KERL & PHILIPP (2015) sind viele weitere, gebiets- und seasonspezifische Summenlinien zu finden.

### Quantitative Verifikationsmaße – ROC-Spaces

Die Darstellungsform des ROC-Spaces (siehe Abschnitt 2.4.1) erlaubt die Einordnung der Vorhersage-Produkte entsprechend ihrer Kosten (False Positive Rate bzw. der Spezifität) und Nutzen (True Positive Rate oder Sensitivität). In den Grafiken werden die Vorhersagegüten der QPF in Abhängigkeit definierter Schwellenwerte (repräsentiert durch Kreissignaturen unterschiedlicher Größe in Abb. 6.3.8) dargestellt. Für manche Schwellenwerte kann der entsprechende Punkt im ROC-Space nicht dargestellt werden. Dies liegt an der nicht definierten True Positive Rate im Falle von True Positives = 0 und False Negatives = 0.

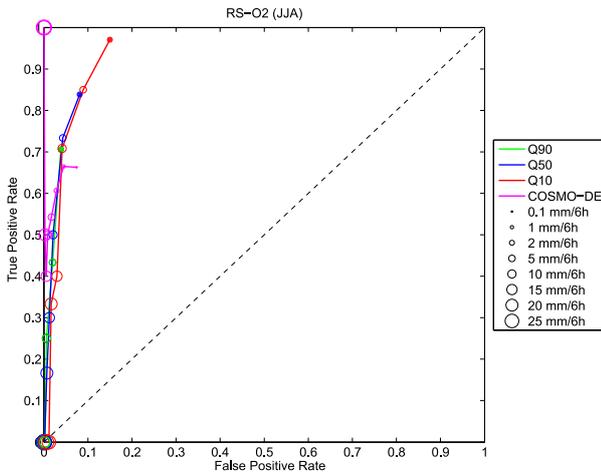
**Tabelle 6.3.1:** Kontingenztabelle für den Schwellenwert 5 mm in 6 h für das Vorhersagegebiet Röder und Schwarze Elster oberhalb 200 m ü. NN im Sommerquartal (Monate JJA), im Zeitraum 04/2011–06/2014; QPF: 90er-Perzentil der DWD-Quantilvorhersage.

		Beobachtung	
		Ja	Nein
Q90	Ja	26	23
	Nein	34	1.142
Summe		60	1.165

Die False Positive Rate ist jedoch immer definiert, da die True Negatives stets größer 0 sind.

Bevor die ROC-Ergebnisse vorgestellt werden, soll zunächst eine konkrete Kontingenztabelle (vgl. Tab. 2.4.1) besprochen werden, beispielhaft für das 90er-Perzentil der Quantilvorhersage. In Tabelle 6.3.1 sind die absoluten Häufigkeiten für den Schwellenwert 5 mm in 6 h für das Vorhersagegebiet RS-O2 im Sommerquartal (Monate JJA) dargestellt. Insgesamt registriert die Messung in 60 Fällen eine Schwellenwertüberschreitung. Das 90er-Perzentil überschreitet in 26 dieser Fälle ebenfalls den Schwellenwert und bleibt in den übrigen 34 Zeitschritten darunter. Entsprechend Gleichung 2.4.1 ergibt sich daraus eine True Positive Rate von 43 %. Von den übrigen 1.165 durch die Messung registrierten Schwellenwertunterschreitungen überschreitet das 90 %-Quantil den Schwellenwert in 23 Fällen. Daraus ergibt sich nach Gleichung 2.4.2 eine False Positive Rate von 2 %. Gemäß Gleichungen 2.4.4 und 2.4.5 errechnet sich ein Equitable Threat Score in dem betrachteten Vorhersagegebiet von 0,29.

Wie in Abschnitt 6.3.2 bereits erläutert, ist der Punkt (0/1) des ROC-Spaces mit maximaler Spezifität und Sensitivität als Optimum anzusehen. Für die QPFs ist in den ROC-Curves eine deutliche Abhängigkeit zwischen den Niederschlagsschwellenwerten und der Vorhersagegüte zu beobachten. Generell zeichnen sich die Ergebnisse für kleinere Schwellenwerte durch eine hohe Sensitivität und geringere Spezifität aus. Bei steigenden Schwellenwerten sinkt die Sensitivität bei gleichzeitigem Anstieg der Spezifität. Hohe Schwellenwerte von größer 15 mm werden z. B. nur noch sehr selten durch die Vorhersageprodukte überschritten, was sich in sehr geringen Sensitivitäten aber gleichzeitig hohen Spezifitäten niederschlägt. Im Falle der Quantilvorhersagen zeigen sich besonders bei Schwellenwerten bis 5 mm deutliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Perzentilen. Während sich das 90er-Perzentil durch gerin-



**Abbildung 6.3.8:** ROC-Curves für das Vorhersagegebiet Röder und Schwarze Elster oberhalb 200 m ü. NN im Sommerquartal (Monate JJA) im Zeitraum 04/2011–06/2014.

gere Sensitivitäten bei gleichzeitig höheren Spezifitäten auszeichnet, sind die Sensitivitäten des 10er-Perzentils höher, was zugleich geringere Spezifitäten nach sich zieht.

Folglich können in einem Vergleich die Vorhersagen des 90er-Perzentils, aufgrund seltener Schwellenwertüberschreitungen, verbunden mit höheren Trefferquoten, als eher konservativ und die Vorhersagen des 10er-Perzentils, aufgrund häufigerer Schwellenwertüberschreitung unter gleichzeitiger Akzeptanz höherer Fehlerquoten, als eher liberal klassifiziert werden. Die ROC-Curve des COSMO-DE-Produktes verläuft bis zu einem Schwellenwert von 10 mm in 6 h gleichläufig zu den übrigen Vorhersageprodukten, steigt dann jedoch an. Dieser Anstieg der Sensitivität bei Erhöhung der Schwellenwerte ist nicht gleichverteilten Daten geschuldet. Demnach kann sich bei Erhöhung des Schwellenwertes der Besatz der Kontingenztabelle und damit auch die Statistik sprunghaft ändern.

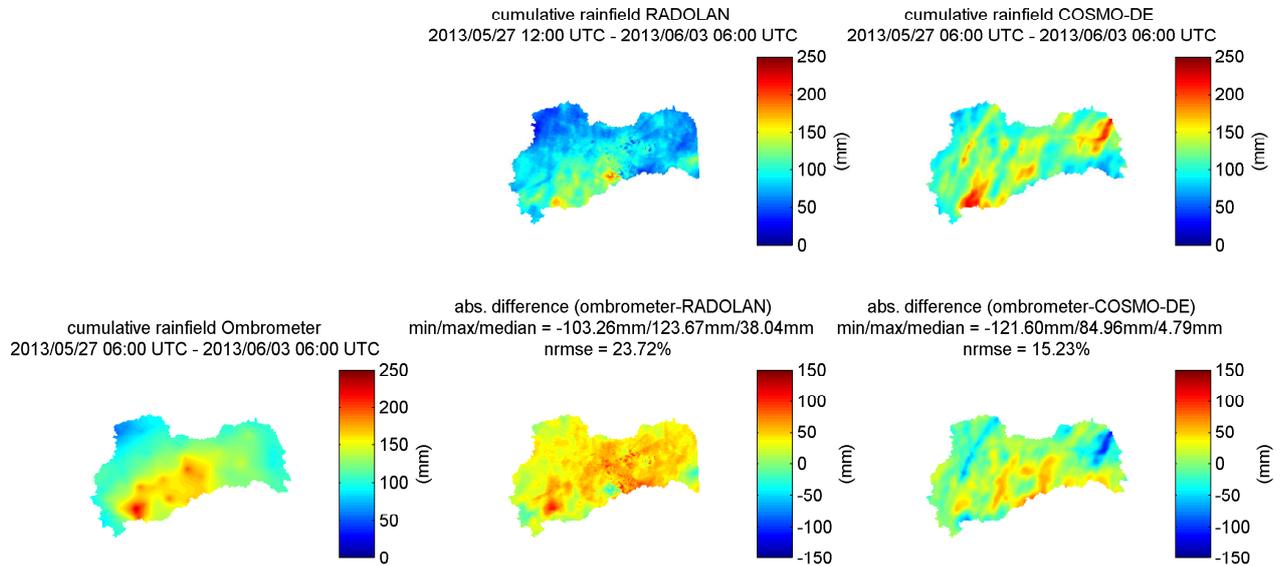
### 6.3.4 Verifikation am Beispiel des Hochwasserereignisses im Mai/Juni 2013

Anhand der Woche vom 27.5.2013 06:00 UTC bis 03.06.2013 06:00 UTC wird eine ereignisbasierte Verifikation von QPFs/QPEs für das 2013-Ereignis durchgeführt. Innerhalb des genannten Zeitraumes traten in Sachsen Niederschlagssummen von bis zu 250 mm auf (vgl. Abbildung 6.3.9). Anhand der mittels Radar abgeschätzten

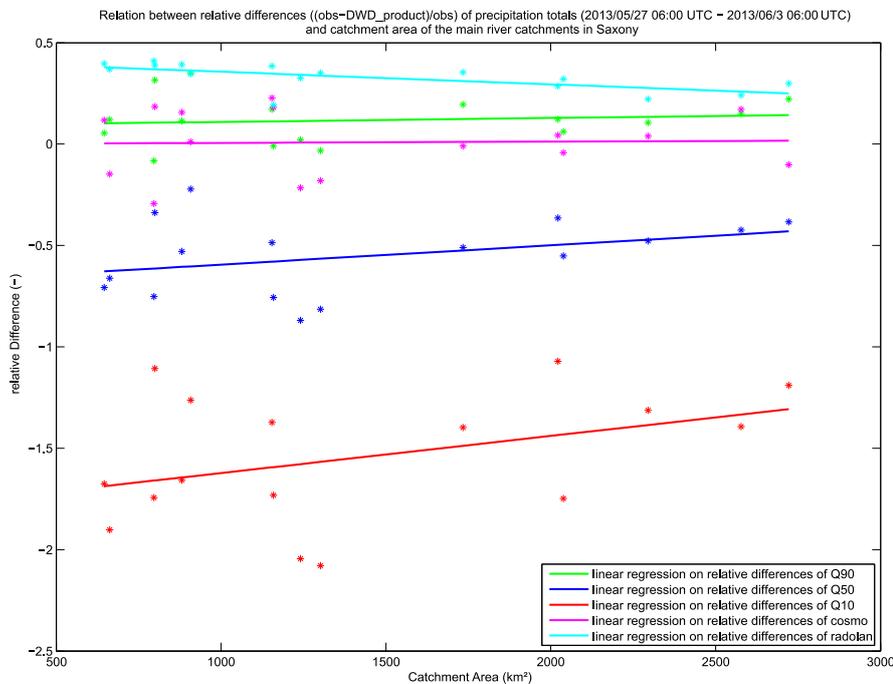
kumulativen Niederschlagsfelder sind zwei Niederschlagszentren im westlichen und zentralen Erzgebirge auszumachen. Aufgrund eines Datenausfalls fehlen beim Radar-QPE die Niederschlagssummen vom 27.05.2013 06:00–12:00 UTC. Zusätzlich deckt die RADOLAN-Domäne das Bundesland Sachsen nicht vollständig ab, weshalb das Flussgebiete der Lausitzer Neiße nicht vollständig berücksichtigt werden konnte. Das von COSMO-DE vorhergesagte Niederschlagsfeld weist bänderartige Strukturen und ein dominantes Niederschlagszentrum im Westerzgebirge auf (Abb. 6.3.9, oben rechts). Vergleicht man die beiden Felder (RADOLAN und COSMO) mit dem Niederschlagsfeld aus interpolierten Stationsdaten (Abb. 6.3.9, untere Reihe Mitte und rechts), so zeigen sich Unterschiede, die bei Überschätzung von COSMO-DE blau und bei Unterschätzung rot eingefärbt sind. Die bänderartigen Strukturen des COSMO-DE-Feldes führen vor allem im Bereich der Oberlausitzer und Muskauer Heide zu deutlichen Überschätzungen der beobachteten Niederschlagssummen. Betrachtet man jedoch die Niederschlagssummen auf der Skala der Vorhersagegebiete (vgl. Abb. 6.3.10), so stimmen diese mit den Beobachtungen im Mittel recht gut überein.

Der nRMSE der DWD-Produkte beträgt 24 bzw. 15 % (RADOLAN/COSMO-DE) der beobachteten Spannweite der Niederschlagssummen. Untersucht man die Niederschlagssummen des gleichen Zeitraumes auf Flussgebietsebene, so können zusätzlich die Quantilvorhersagen in die Auswertung mit einbezogen werden. In Abbildung 6.3.10 sind die beobachteten, die vorhergesagten sowie die mittels Radar abgeschätzten Niederschlagssummen für die Vorhersagegebiete dargestellt. Die Mediane der Abweichung zwischen Beobachtung und den betrachteten Produkten belaufen sich auf 12/–52/–153/2/34 % (Q90/Q50/Q10/COSMO-DE/RADOLAN) der beobachteten Spannweite. Positive Werte bedeuten eine Unterschätzung der beobachteten Niederschlagssumme durch das jeweilige Produkt und negative Werte die Überschätzung der Beobachtung. Zur Darstellung des zeitlichen Verlaufes der Gebietsniederschläge wurden für jedes Vorhersagegebiet die sechsstündigen Niederschlagshöhen aller DWD-Produkte aufgetragen. In Abbildung 6.3.11 sind die Ganglinien der Niederschlagsentwicklung exemplarisch für das Vorhersagegebiet Zwickauer Mulde oberhalb 300 m ü. NN dargestellt (weitere Abbildungen siehe Anhang von KERL & PHILIPP, 2015).

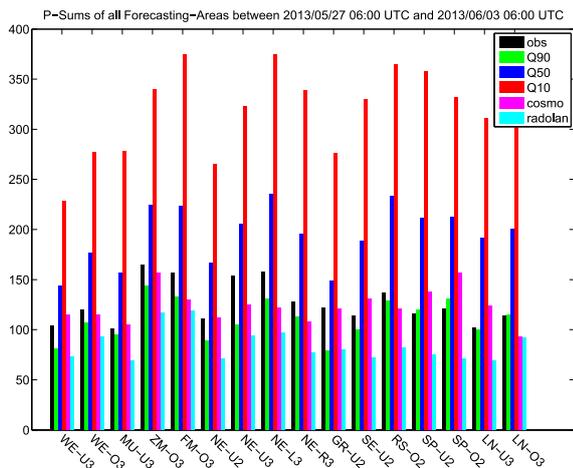
Die bisherigen Betrachtungen ließen den Einfluss der Einzugsgebietsgröße auf die Unterschiede zwischen Be-



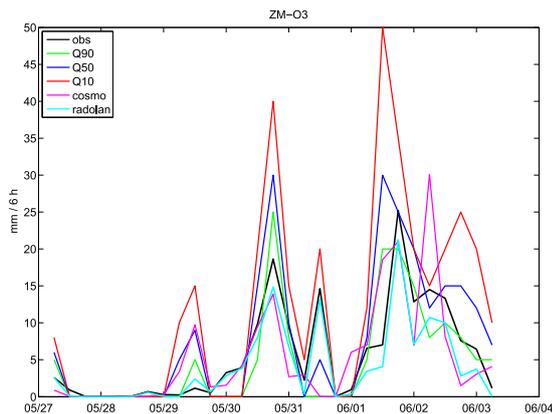
**Abbildung 6.3.9:** Kumulierte Niederschlagsfelder (COSMO-DE, RADOLAN) innerhalb des Zeitraumes 27.05.2013 06:00 UTC bis 03.06.2013 06:00 UTC. Dargestellt sind auch die außerhalb Sachsens liegenden Flussgebietsteile.



**Abbildung 6.3.12:** Abhängigkeit des relativen Fehlers zwischen Beobachtung und den untersuchten DWD-Produkten von der Einzugsgebietsgröße im Zeitraum 27.05.2013 06:00 UTC bis 03.06.2013 06:00 UTC.



**Abbildung 6.3.10:** Niederschlagssummen von 27.05.2013 06:00 UTC bis 03.06.2013 06:00 UTC in den betrachteten 16 Vorhersagegebieten.



**Abbildung 6.3.11:** Ganglinien der mittleren 6-h-Gebietsmittel im Vorhersagegebiet ZM-O3 von 27.05.2013 06:00 UTC bis 03.06.2013 06:00 UTC.

obachtung und den QPFs bzw. dem Radar-QPE außer Acht. Das allgemein anerkannte Skalen-Problem bei der Beurteilung quantitativer Niederschlagsvorhersagen und -schätzungen (vgl. Abb. 6.4.2) soll jedoch im Rahmen dieser Untersuchung ebenfalls aufgegriffen und behandelt werden. Aus diesem Grund wurden in Abb. 6.3.12 die relativen Differenzen zwischen Beobachtung und DWD-Produkten gegen die Einzugsgebietsgröße der Vorhersagegebiete aufgetragen, um eventuell einen Trend ableiten zu können. Generell zeichnet sich bei dem 10er- und 50er-Perzentil sowie bei RADOLAN eine signifikante Abnahme der relativen Differenz mit zunehmender Einzugsgebietsgröße ab. Zusätzlich sieht man bei allen untersuchten Produkten, dass die Streu-

ung der Residuen um die Regressionsgerade ebenfalls mit zunehmender Einzugsgebietsgröße abnimmt. Somit zeigt sich, wie ebenfalls in ROBERTS & LEAN (2008) diskutiert, die Abnahme der Vorhersagegüte der quantitativen Niederschlagsvorhersage und -schätzung mit abnehmender Einzugsgebietsgröße.

**Schlussfolgerung 26:** Die Güte und Eignung von QPFs zur Vorhersage von Gebietsniederschlägen ist eine Funktion der Magnitude/Schwellenwerte der untersuchten Ereignisse, der Vorhersageweite bzw. des Vorhersagezeitraums sowie der Größe der betrachteten Bilanzgebiete. Aus hydrologischer Sicht interessante Ereignisse größerer Jährlichkeiten sind aufgrund ihrer Seltenheit nicht oder nur schwer zu verifizieren. ♦

## 6.4 Diskussion

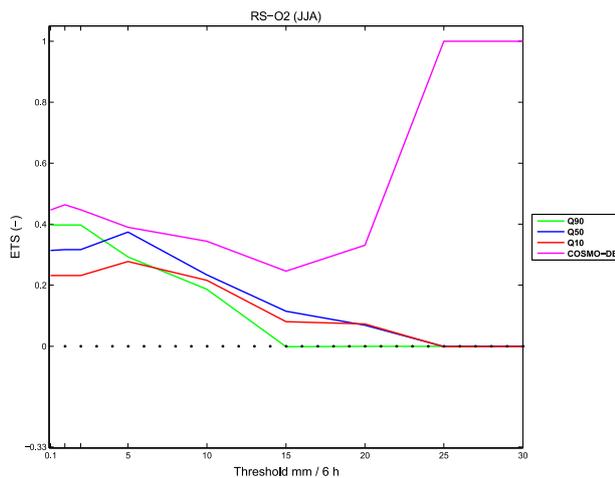
Die Karten relativer Häufigkeiten von Schwellenwertüberschreitungen zeigen zunächst, dass die beobachteten Verteilungen der Gebietsniederschläge (saisonal getrennt und im Gesamtzeitraum) von den DWD-Produkten gut abgebildet werden. Die Übereinstimmungen zwischen beobachteten und vorhergesagten Schwellenwertüberschreitungen sind hierbei bei COSMO-DE und dem 90er-Perzentil am größten. In Schwellenwertbereichen kleiner 5 mm in 6 h zeigen sich, durch die Konvention bei den Quantilvorhersagen (Gebietsniederschlag kleiner 4,5 mm in 6 h gleich „kein Niederschlag“) bedingt, größere Häufigkeitsabweichungen zwischen den Quantilvorhersagen und der Beobachtung. Aus diesem Grund werden die Überschreitungshäufigkeiten durch das 90er-Perzentil in diesem Schwellenwertbereich ebenfalls unterschätzt. Das 50er- und 10er-Perzentil weisen eine systematische Überschätzung der beobachteten Gebietsniederschläge auf, was auch die Quantil-Quantil-Plots deutlich zeigen. Weiterhin sind jedoch keine eindeutigen produkt- und einzugsgebietspezifischen Signale zu erkennen. In den hydrologisch relevanten Schwellenwertbereichen (größer 15 mm in 6 h) wird die zunehmende Abnahme der relativen Überschreitungshäufigkeiten und damit auch der Datenpunkte in den Q-Q-Plots bedeutsam. Durch die geringen Stichprobenumfänge und die geringen Unterschiede in den relativen Häufigkeiten zwischen den einzelnen DWD-Produkten kann in diesem Bereich keine klare Aussage hinsichtlich der Überlegenheit eines einzelnen Produktes gemacht werden.

Zur allgemeinen Übersicht hinsichtlich einer quantitativen Verifikation dienen die Boxplots des normalisierten RMSE. Es zeigt sich eine annähernd gleiche Güte des 90%-Quantils und COSMO-DE mit geringer Streuung und damit geringen Fehlerschwankungen zwischen den Vorhersagegebieten, zwischen den Jahren im Untersuchungszeitraum und zwischen den Jahreszeiten. RADOLAN weist den kleinsten Median und die geringste Streuung der normalisierten RMSEs auf. An dieser Stelle muss jedoch nochmals darauf hingewiesen werden, dass RADOLAN kein Vorhersageprodukt sondern eine radarbasierte Niederschlagschätzung darstellt und folglich nicht direkt mit den Vorhersageprodukten verglichen werden kann. Die jahreszeitlich getrennte Betrachtung zeigt eine Zunahme der Streuung in den Sommermonaten (JJA), die auf das vermehrte Auftreten konvektiver Witterung zurückzuführen ist. Aufgrund der Unsicherheiten in der Erfassung konvektiver Niederschläge mit dem bestehenden Messnetz ist die Ursache für die größere Spannweite des nRMSE nicht vollständig zu klären. Im Winterquartal (Monate DJF) ist außerdem eine leichte Zunahme der Mediane der nRMSE der Vorhersageprodukte und RADOLAN zu sehen, welche vermutlich an der Schneebeeinflussung liegt. In diesem Fall kann ebenfalls aufgrund der schneebedingten Unsicherheiten bei Ombrometermessungen nicht sicher auf tendenziell schlechtere Vorhersagen geschlossen werden. Im Herbst- und Winterquartal (Monate SON und DJF) sind entgegengesetzt zu den übrigen Quartalen höhere nRMSE des RADOLAN-Produktes ersichtlich. Der Grund hierfür kann jedoch auf Basis der vorliegenden Datengrundlage nicht ermittelt werden.

Der zeitabhängige Vergleich mittels Streudiagrammen zeigt besonders zwischen Beobachtung und RADOLAN eine Tendenz zur Unterschätzung beim Radar-Produkt; es ist eine leichte systematische Unterschätzung der beobachteten Gebietsniederschläge in allen Einzugsgebieten zu erkennen. Hierbei muss jedoch bedacht werden, dass aus Stationsdaten interpolierte Niederschlagsfelder die tatsächlich eingetretenen Niederschlagssummen möglicherweise überschätzen. Zusätzlich wurde der Effekt beobachtet, dass speziell bei konvektiven Ereignissen starke Niederschlags-Gradienten im Zuge der Online-Aneichung teilweise geglättet werden (WEIGL, 2009). Die tatsächlich gefallene Niederschlagsmenge bewegt sich vermutlich zwischen der RADOLAN-Schätzung und den interpolierten Ombrometerdaten. Eine weitere Auffälligkeit zeigt sich im Vergleich zwischen den von COSMO-DE vorhergesag-

ten und den beobachteten mittleren Gebietsniederschlägen im Vorhersagegebiet der Lausitzer Neiße oberhalb 300 m ü. NN. Besonders im Sommerquartal (Monate JJA) und bezogen auf den gesamten Untersuchungszeitraum werden Gebietsniederschläge größer 15 mm in 6 h durch die Vorhersage unterschätzt. In den niederschlagsreichen Regionen des Isergebirges liegen keine Ombrometerdaten vor, weshalb das interpolierte Niederschlagsfeld aus Ombrometerdaten vermutlich den tatsächlich eingetretenen Gebietsniederschlag im Gebiet LN-O3 unterschätzt (vgl. Abschnitt 6.2.1). Da die COSMO-DE-Felder dieses Vorhersagegebiet jedoch komplett abdecken, wurde in diesem Zusammenhang eine Überschätzung der Beobachtungen durch das COSMO-DE-Produkt erwartet. Letztendlich ist dieser Sachverhalt auf Basis der vorhandenen Datengrundlage aber nicht vollständig zu klären. Generell zeigt sich jedoch anhand der Streudiagramme (als auch anhand der Summenlinien), dass die von COSMO-DE und vom 90%- sowie 50%-Quantil vorhergesagten mittleren Gebietsniederschläge den beobachteten Werten am besten entsprechen. Im Falle der Quantilvorhersage stimmen im Vergleich mit den bisherigen Verifikationsergebnissen die Vorhersagen des 90er-Perzentils am besten mit den Beobachtungen überein.

Die ROC-Curves (dichotome Auswertung) lassen keine Aussage hinsichtlich einer etwaigen Überlegenheit eines bestimmten Vorhersageproduktes zu. Aufgrund sehr kleiner Stichprobenumfänge in Schwellenwertbereichen größer 15 mm in 6 h schwanken die Vorhersagegüten deutlich. Aus hydrologischer Sicht ist die Bewertung der Vorhersagegüte quantitativer Niederschlagsvorhersage-Produkte in Schwellenwertbereichen größer 15 mm in 6 h für die Feststellung ihrer Eignung als Antrieb für hydrologische Hochwasservorhersagen jedoch von zentraler Bedeutung. Im Allgemeinen ist die Auswertung der Gütemaße in diesem Schwellenwertbereich durch eine sehr geringe Belegung der sogenannten nicht-trivialen Zellen der Kontingenztabelle (als nicht-trivial gelten TP, FP, FN) problematisch und die Signifikanz der Ergebnisse in Frage zu stellen. Eine Überprüfung der zugrunde liegenden Kontingenztabelle zeigte, dass eine TPR = 1 und FPR = 0 oder ein ETS = 1 ab einem Schwellenwert von 15 mm in 6 h auf lediglich einen bis zwei TP-Werte zurückzuführen sind! Um diesbezügliche Missinterpretationen der Vorhersagegüte zu vermeiden wurde in vergleichbaren Verifikationen durch den DWD ein empirischer Schwellenwert von mindestens zehn Belegungen in den nicht-trivialen Zellen der Kontin-



**Abbildung 6.4.1:** Abhängigkeit des Equitable Threat Scores (ETS) vom Schwellenwert des Niederschlages im Vorhersagegebiet Große Röder und Spree oberhalb 300 m ü. NN. Ab Schwellenwerten von 15 mm in 6 h ist ein erraticches Verhalten des Scores (aufgrund gering besetzter Stichproben) erkennbar.

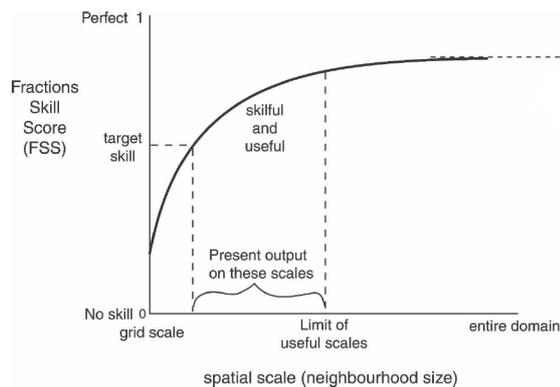
genztabelle festgelegt (DWD, 2012). Demzufolge konnten im Rahmen der vom DWD unternommenen Verifikation lediglich Schwellenwerte bis 5 mm pro h ausgewertet werden. Um den beschriebenen Effekt in den Grafiken zu zeigen, wurde diese Restriktion in der vorliegenden Untersuchung jedoch nicht angesetzt (siehe Entwicklung des ETS von COSMO-DE in Abb. 6.4.1). Weitere Ergebnisse befinden sich im Anhang von KERL & PHILIPP (2015).

Neben den Ergebnissen muss die Methodik der Verifikation kritisch beleuchtet werden. Im Wesentlichen soll hierbei auf die Gewinnung der Vergleichsdaten eingegangen werden, im Speziellen auf die Anpassung der raum-zeitlichen Auflösung der Vorhersageprodukte. Wie bereits in Abschnitt 6.3.1 angesprochen, mussten sowohl die Ombrometerdaten, als auch das COSMO-DE- sowie das RADOLAN-RW-Produkt auf die räumliche Auflösung der 16 Vorhersagegebiete gebracht werden. Im Falle der COSMO-DE- und RADOLAN-Produkte impliziert dies jedoch eine deutliche Verringerung der produktspezifischen räumlichen Auflösung. Neben der räumlichen Aggregation musste auch die zeitliche Auflösung der Ombrometerdaten und des COSMO-DE- sowie des RADOLAN-Produktes auf die der Quantilvorhersagen angepasst werden. Auch in diesem Fall ist dieser Schritt mit einer deutlichen Verringerung der produktspezifischen zeitlichen Auflösung von COSMO-DE und RADOLAN verbunden. Der raum-zeitlich höheren Auflösung der COSMO-DE-Vorhersage sowie der RADOLAN-Schätzung wird folglich im Rahmen dieser Stu-

die keine Rechnung getragen. Im Zuge der Gewinnung der Vergleichsdaten wäre die Interpolation der Ombrometerdaten und die Repräsentanz der daraus gewonnenen Gebietsniederschläge ebenfalls zu bewerten. Aufgrund der starken Abhängigkeit der Interpolationsgüte von der Stationsdichte und der Gliederung des Geländes muss die damit erzielte Vergleichsgrundlage kritisch hinterfragt werden. Weiterhin wurde der zeitliche Verlauf der Verifikationsmaße nicht untersucht. In diesem Zusammenhang wäre interessant, wie sich die Vorhersagegüte der QPF und die Güte des QPE mit zunehmendem Vorhersagezeitraum entwickelt.

Ein weiterer Diskussionspunkt ist die Verifikationsmethodik an sich. PAULAT (2007) hebt in diesem Zusammenhang hervor, dass mittels Standardfehlermaßen die Charakteristik der Modelldefizite nicht hinreichend gut aufgezeigt werden kann. Verifiziert ein Vorhersageprodukt schlecht, so ist zunächst anhand der Standardfehlermaße nicht zu ermitteln, ob es sich beispielsweise um eine räumliche Verschiebung des Niederschlagsfeldes oder um einen Amplitudenfehler handelt. Im Umkehrschluss kann jedoch davon ausgegangen werden, dass ein Vorhersageprodukt mit einem guten Verifikationsergebnis auch als gut bewertet werden kann. Folglich ist bei der Interpretation geringer Verifikationsgüten Vorsicht geboten.

Aufhänger dieser Verifikationsstudie ist die Überprüfung der Eignung verschiedener Vorhersageprodukte für hydrologische Vorhersagen für kleine Einzugsgebiete. Mit Blick auf die räumliche Dimension der Fragestellung kann diese Studie nur eine erste Einschätzung der Vorhersagegüte bieten, da sich die untersuchten Gebietsgrößen zwischen 600 und 3.000 km<sup>2</sup> bewegten. Demzufolge lassen sich die Ergebnisse auf die Skala kleiner(er) Einzugsgebiete nicht ohne weiteres übertragen. Einen ersten Eindruck lieferte jedoch die einzugsgebietsgrößenabhängige Betrachtung der relativen Differenzen im Zeitraum Mai/Juni 2013 (siehe Abb. 6.3.12). Es wurde die Zunahme des relativen Fehlers mit abnehmender Einzugsgebietsgröße beobachtet (vgl. hierzu Abb. 6.4.2). Des Weiteren war mit der Abnahme der Einzugsgebietsgröße eine Zunahme der Streuung der Residuen zu erkennen. Für eine abschließende Beurteilung bedarf es weiterführender Untersuchungen. Auf Grundlage der gewonnenen Ergebnisse kann die Überlegenheit eines bestimmten quantitativen Niederschlagsvorhersageproduktes – COSMO-DE oder Quantilvorhersage – als Antrieb für hydrologische Vorhersagen zunächst nicht festgestellt werden.



**Abbildung 6.4.2:** Abhängigkeit der Vorhersagegüte von der räumlichen Skala. Abbildung entnommen aus ROBERTS & LEAN, 2008.

Generell besteht Übereinkunft darüber, dass die Vorhersagegüte mit sinkender Einzugsgebietsgröße zunächst kontinuierlich und ab einem gewissen Schwellenwert exponentiell abnimmt. Ist dieser Schwellenwert bekannt, so kann eine konkrete Aussage über die Eignung der Vorhersageprodukte für hydrologische Vorhersagen für kleine Einzugsgebiete getroffen werden. Eine Studie aus der RIMAX-Förderperiode belegte beispielsweise, dass in einem Einzugsgebiet im Weißeritzgebiet von 50 km<sup>2</sup> (Ammelsdorf) die Unsicherheiten der quantitativen Niederschlagsvorhersage den größten Anteil an der Gesamtunsicherheit der hydrologischen Vorhersage verursachten (KNEIS ET AL., 2012). Folglich ist die Eignung quantitativer Niederschlagsvorhersagen als Antrieb für hydrologische Vorhersagen in diesem Skalen-Niveau, wenn nicht in Frage zu stellen, zumindest zu untersuchen. Die im Rahmen dieser Studie erhaltenen Ergebnisse zeigen, dass quantitative Niederschlagsvorhersagen in dem betrachteten Skalen-Niveau von 600 bis 3.000 km<sup>2</sup> durchaus einen prädiktiven Nutzen aufweisen. Der Schwellenwert der Einzugsgebietsgröße, ab welchem die Vorhersagegüte der Niederschlagsvorhersage deutlich abfällt, ist in dem Bereich zwischen 50 und 600 km<sup>2</sup> zu suchen.

Im Hinblick auf konkrete Anforderungen an hydrologische Vorhersagen ist neben der Einzugsgebietsgröße auch der Vorhersagehorizont von großer Bedeutung. Ein in diesem Zusammenhang interessanter Aspekt ist die Ermittlung der zeitlichen Entwicklung der Vertrauenswürdigkeit von quantitativen Niederschlagsvorhersagen innerhalb eines bestimmten Vorhersagezeitraums. Die vorliegende Verifikationsstudie erlaubt folglich zunächst eine erste Gütebewertung der untersuchten Vorhersageprodukte. Für

detailliertere Aussagen ist die Methodik weiter zu vertiefen. Zusätzlich sollten weitere, dem LHWZ vorliegende Vorhersageprodukte in die Analyse einbezogen werden, um dann eine differenzierte Aussage über die Eignung dieser Produkte als Antrieb für hydrologische Vorhersagen treffen zu können. Insbesondere ist in diesem Zusammenhang der Analyse probabilistischer Niederschlagsvorhersageprodukte – wie dem COSMO-DE-EPS-Produkt – größeres Gewicht beizumessen, da deren bessere Vorhersagegüte im Vergleich zu deterministischen Vorhersageprodukten bereits in vielen Studien hervorgehoben wurde (z. B. KNEIS ET AL., 2012; ROBERTS & LEAN, 2008).

**Schlussfolgerung 27:** Auf Basis von Verifikationsergebnissen ist es schwer, ein bestimmtes Produkt zu bevorzugen oder auszuschließen. Bei der Wahl einer geeigneten QPF für hydrologische Anwendungen müssen daher noch weitere Aspekte berücksichtigt werden (z. B. Verfügbarkeit des Produkts, Verarbeitbarkeit etc.). Ideal wäre im operationellen Kontext das Einbeziehen mehrerer QPFs, wobei die Wahl der „richtigen“ dann wiederum einem Vorhersagemeteorologen/-hydrologen obliegen sollte. ❖

## 7 Weiterführende Verifikation meteorologischer Antriebsdaten (inklusive probabilistischer QPF)

Im vorangegangenen Kapitel – welches sich in erster Linie der Verifikation deterministischer quantitativer Niederschlagsvorhersagen widmete – sind bestimmte Fragen offen geblieben beziehungsweise wurde deren Beantwortung noch nicht mit letzter methodischer Konsequenz verfolgt. Diese offenen Punkte werden nun adressiert. Zum einen soll die Abhängigkeit zwischen Vorhersagezeitraum/-weite, Größe des Bilanzgebietes („Einzugsgebietsgröße“) sowie der Vorhersagegüte umfassender abgeleitet und herausgestellt werden. Zum anderen soll nun ebenfalls eine probabilistische QPF (Ensemblevorhersage) mit in die Verifikationsuntersuchungen einbezogen werden, was die Anwendung probabilistischer Verifikationsmethoden (siehe Abschnitt 2.4.3) notwendig macht.

So soll die Eignung probabilistischer und deterministischer Niederschlagsvorhersageprodukte als Antrieb für ein Hochwasserfrühwarnsystem für kleine Einzugsgebiete vergleichend bewertet werden. Letztendlich flankieren die Ergebnisse die Entwicklung eines Frühwarnsystems insofern, dass klar wird, innerhalb welcher raum-zeitlicher Skalenbereiche sowie für welche Ereignisintensitäten überhaupt ein prädiktiver Nutzen durch quantitative Niederschlagsvorhersagen zu erwarten sein kann. Eine detaillierte Darstellung des in diesem Kapitel beschriebenen Teilvorhabens findet sich im entsprechenden Teilprojektbericht bei SCHÜTZE ET AL. (2016). Bezogen auf den Meilensteinplan des Gesamtprojekts (Tabelle 3.4.2) handelt es sich bei der Untersuchung um den Meilenstein Nummer 7.

### 7.1 Untersuchte Produkte

Das Ziel einer Ensemblevorhersage ist es, die mögliche Spannweite der Ausprägung eines bestimmten Merkmales mit einer gewissen Anzahl an deterministischen Ergebnissen (dem Ensemble) zu sampeln und diese Ergebnismenge statistisch zu interpretieren. Es ist nunmehr allgemein anerkannt, dass auf Basis von Ensembles vorhergesagter Niederschlagsverläufe erstellte hydrologische Vorhersagen

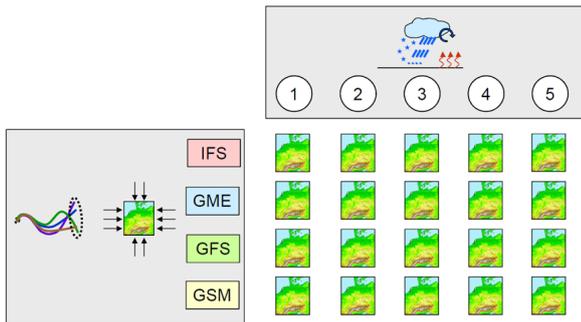
verlässlicher sind, als Vorhersagen auf Basis lediglich eines Modellergebnisses (wie z. B. der Fall bei COSMO-DE; vgl. z. B. TODINI, 2004). Das seit Mai 2012 operationell verfügbare COSMO-DE-EPS-Produkt umfasst dabei derzeit 20 Member (plus einen deterministischen Lauf bzw. Kontrolllauf). Damit ist nicht zuletzt ein nicht unerheblicher datenverarbeitungstechnischer Aufwand verbunden (COSMO-DE-EPS: rund 12 Gigabyte Datenanfall pro Tag).

Als Vergleichsdatensatz wird das bereits in Kapitel 6 vorgestellte deterministische Produkt COSMO-DE herangezogen (siehe Abschnitt 6.2.3); analog dient als Referenz-QPE das RADOLAN-RW („Ground Truth“; siehe Abschnitt 6.2.4). Da bereits vorgestellt, soll auf die Produkte COSMO-DE (QPF) und RADOLAN-RW (QPE) an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden.

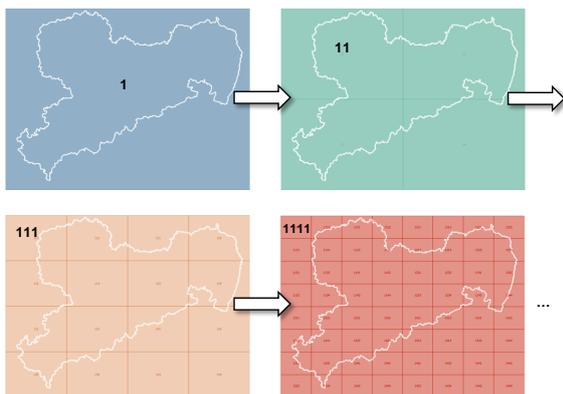
Beim COSMO-DE-EPS handelt es sich um ein Ensemble-Vorhersagesystem (EPS), welches wiederum auf dem Wettervorhersagemodell COSMO-DE basiert. Es beruht auf der Kombination von Randwert-Antrieben aus unterschiedlichen globalen-NWP-Modellen (beispielsweise GME, GFS etc.) mit fünf verschiedenen Konstellationen von perturbierten Anfangsbedingungen und unterschiedlichen Modellphysik-Schemata (für Details siehe THEIS ET AL., 2015). Somit ergeben sich 20 Ensemble-Mitglieder (siehe Abbildung 7.1.1). Der 21. Member des Ensembles wird durch den sog. Kontrolllauf erzeugt, bei dem das NWP-Modell in der Standardkonfiguration betrieben wird. Der Kontrolllauf-Output von COSMO-DE-EPS und Output des Standard-COSMO-DE-Modells sind dabei nicht identisch.

### 7.2 Bildung von Bilanzgebieten und Gewinnung von Vergleichsdaten

Um die Verifikation mit Blick auf den Einfluss der Größe des betrachteten Bilanzgebietes auf die Vorhersagegüte führen zu können, wurden, ausgehend von einer über Sachsen lie-



**Abbildung 7.1.1:** Schema zur Generierung der 20 nicht-trivialen Member des COSMO-DE-EPS-Outputs. Vier verschiedene Randwert-Antriebe aus unterschiedlichen globalen NWP-Modellen werden mit fünf verschiedenen Konstellationen von perturbierten Anfangsbedingungen und unterschiedlichen Modellphysik-Schemata multipliziert. Abbildung entnommen aus BUCHHOLD ET AL. (2014).



**Abbildung 7.2.1:** Schema der angewendeten Flächenteilung zur Ableitung der Bilanzgebiete sowie zu deren Indizierung. Abbildung angelehnt an SCHÜTZE ET AL. (2016).

genden Einheitsfläche,<sup>1</sup> durch fortlaufende Flächenteilung (Vierteilung) zunehmend kleinere Bilanzgebiete erzeugt. Die entstehenden Teilflächen wurden dabei mit einer eindeutigen ID-Nummer belegt, wobei die Anzahl der Stellen dieser ID zur Teilungsstufe korrespondiert (siehe Abbildung 7.2.1). Insgesamt wurden 6 Teilungen durchgeführt (die ursprüngliche Einheitsfläche hat die Teilungsstufe null). Es ergeben sich für die letzte Teilungsstufe somit 4.096 Bilanzgebiete mit einer Fläche von jeweils 10,55 km<sup>2</sup>. Tabelle 7.2.1 liefert eine Übersicht der durch die Teilungsoperationen erhaltenen Bilanzgebiete.

**Tabelle 7.2.1:** Übersicht der durch die Teilungsoperationen erhaltenen Bilanzgebiete.

Teilungsstufe	ID-Länge	Fläche pro Bilanzgebiet (km <sup>2</sup> )	Anzahl Bilanzflächen
0	1	43.200,00	1
1	2	10.800,00	4
2	3	2.700,00	16
3	4	675,00	64
4	5	168,75	256
5	6	42,19	1.024
6	7	10,55	4.096

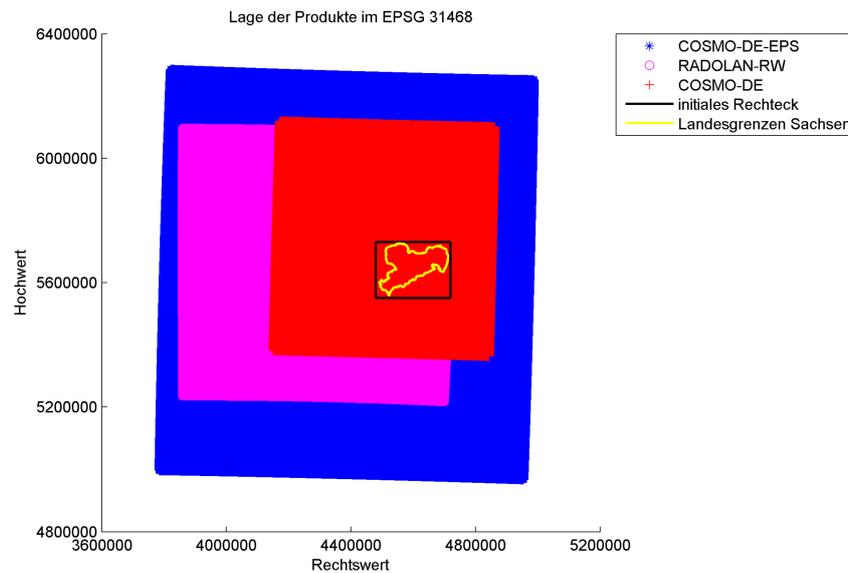
Da die zu untersuchenden Daten teilweise unterschiedliche raum-zeitliche Abdeckungen und Auflösungen aufweisen, muss durch raum-zeitliche Aggregation bzw. Disaggregation ein gemeinsamer Bezug hergestellt werden. Tabelle 7.2.2 enthält eine Übersicht zu den betreffenden Eigenschaften der Untersuchungsdaten. Anhand der Datengrundlage wird als Untersuchungszeitraum 10.12.2010 09:00 UTC bis 19.10.2015 18:00 UTC definiert; damit wurde – bezogen auf den Zeitpunkt der Durchführung der Analysen – fast der vollständige bis dato vorliegende COSMO-DE-EPS-Datensatz einbezogen, was ein Alleinstellungsmerkmal der Untersuchung ist. Vergleichbare Untersuchungen bezogen sich bisher nur auf eher ereignisbezogene, kürzere Zeitbereiche (beispielsweise BUCHHOLD ET AL., 2014; RAUTHE ET AL., 2015; JOHST ET AL., 2016). Der gemeinsame Untersuchungszeitraum umfasst damit 14.196 Zeitschritte. Beim RADOLAN-Produkt gab es keine fehlenden Zeitschritte, wohingegen bei COSMO-DE ein Anteil von 5 % fehlte, bei COSMO-DE-EPS betrug der Fehlwertanteil gar 33 %. Das Aktualisierungsintervall („Update-Zyklus“) der NWP-Produkte beträgt drei Stunden; die zeitlich höher aufgelösten RW-Daten werden demzufolge ebenfalls nur mit dreistündigem Intervallabstand abgetastet (0, 3, 6 UTC usw.).

Alle drei untersuchten Produkte decken die komplette Fläche des Freistaats ab (siehe Abbildung 7.2.2); allerdings fehlt im RADOLAN-Produkt ein Teil des Flussgebietes der Lausitzer Neiße (siehe auch Abbildung 6.2.5). Davon betroffen sind 22 der mit der in Abschnitt 7.2 vorgestellten Methodik gebildeten 4.096 Bilanzflächen der höchsten Teilungsstufe 6 (ca. 0,5 %). Die Niederschlagsprodukte wurden – entsprechend der jeweils betrachteten Teilungsstufe – bezüglich der Bilanzflächen gewichtet gemittelt.

<sup>1</sup>Ausdehnung: Rechtswert 4.480.000 bis 4.720.000 und Hochwert 5.550.000 und 5.730.000 in Gauß-Krüger, EPSG 31468.

**Tabelle 7.2.2:** Übersicht zu Eigenschaften der Untersuchungsdaten. Untersuchungszeitraum: 10.12.2010 09:00 UTC – 19.10.2015 18:00 UTC (14.196 Zeitschritte).

Produkt	Format	Zeitbereich	Lagebezug	Update-Zyklus (h)	Räuml. Auflösung (km)	Nicht nutzbare Zeitschritte	Anteil (%)
RADOLAN-RW	ASCII	01.11.2009 01:00 UTC – 31.10.2015 23:00 UTC	Polarstereographische Projektion	1	1,0	0	0
COSMO-DE	ASCII	01.11.2010 00:00 UTC – 19.10.2015 18:00 UTC	Rotiertes sphärisches Gitter	3	2,8	705	5
COSMO-DE-EPS	GRIB2	10.12.2010 09:00 UTC – 31.10.2015 21:00 UTC	Rotiertes sphärisches Gitter	3	2,8	4.636	33



**Abbildung 7.2.2:** Lage der räumlichen Zuschnitte der untersuchten Produkte (vergleiche auch mit Abbildungen 6.2.4 und 6.2.5). Gemeinsames Bezugssystem: Gauß-Krüger, Zone 4 (EPSG-Code 31468). Abbildung entnommen aus SCHÜTZE ET AL. (2016).

## 7.3 Verifikation der Vorhersageprodukte

Die Verifikation wurde mit den bereits in Abschnitt 2.4 beschriebenen Methoden durchgeführt; die folgenden Gütemaße und Werkzeuge zur quantitativen Bewertung probabilistischer Modellergebnisse kamen dabei zur Anwendung:

- ▶ Deterministische bzw. dichotome Gütemaße:
  - Mean Absolute Error – MAE
  - (normalisierter) Root Mean Square Error – (n)RMSE
  - Multiplicative Bias – mBIAS
  - Area Under Curve – AUC
- ▶ Probabilistische Maße und Werkzeuge:
  - Area Under Curve – AUCEPS
  - Reliability-Diagramme
  - Continuous Ranked Probability Score – CRPS

Die AUC ist das Resultat einer dichotomen Bewertung (siehe Abschnitt 2.4.1) und entspricht dem Integral unter der ROC-Curve (Kurve aus paarigen Werten von Falschalarm- und Trefferrate für verschiedene Niederschlagschwellenwerte). Für probabilistische Produkte ist die AUC anders zu bilden, als für deterministische Vorhersagen. In letzterem Fall (z. B. für einzelne Ensemble-Member oder Mittelwert,

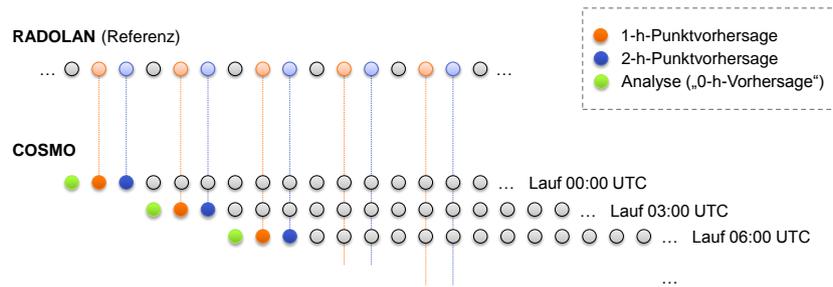
Median etc. eines Ensemble-Produkts) erfolgt die Berechnung der AUC wie in Abschnitt 2.4.1 dargestellt. Im probabilistischen Fall hingegen wird die AUC wie in Abschnitt 2.4.3 beschrieben berechnet. Zur Unterscheidung wird die „deterministische AUC“ hierin als AUC, die „probabilistische AUC“ hingegen als AUCEPS bezeichnet.

### 7.3.1 Verifikation anhand deterministischer Gütemaße

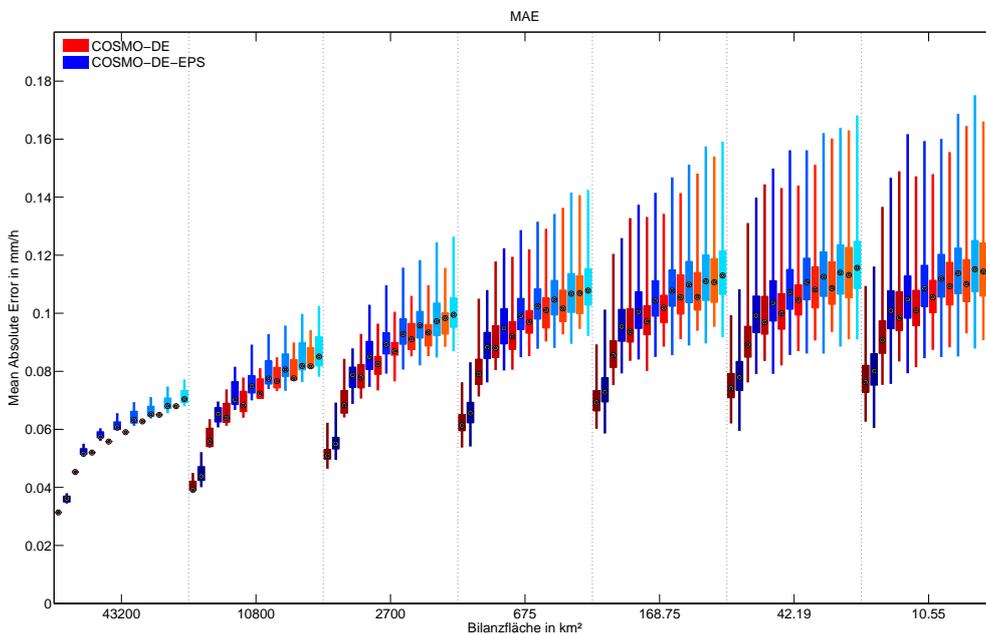
Zunächst wurden die in Abschnitt 2.4.2 beschriebenen deterministischen Gütemaße ermittelt. Räumlich wurden die Maßzahlen jeweils für alle Zellen einer Teilungsstufe bestimmt (siehe Tabelle 7.2.1). In der zeitlichen Domäne wurden zunächst Punktvorhersagen verifiziert; es wurde also beispielsweise für COSMO-DE eine zu verifizierende Zeitreihe aus allen 1-h-Vorhersagen der in dreistündigem Abstand für den gesamten Untersuchungszeitraum vorliegenden Vorhersagezeitreihen erstellt usw. Abbildung 7.3.1 illustriert dieses Vorgehen.

#### Mean Absolute Error (MAE)

Abbildung 7.3.2 zeigt die ermittelten Abhängigkeiten des mittleren absoluten Fehlers von der Größe der Bilanzgebiete sowie von der Vorhersageweite. Für die nullte Teilungsstufe existiert nur ein Bilanzgebiet (43.200 km<sup>2</sup>). In Abbildung 7.3.2 (Boxplot-Gruppe ganz links) spiegelt sich das im



**Abbildung 7.3.1:** Methodik zur Erstellung der zu verifizierenden Zeitreihen. Aus den unterschiedlichen NWP-Modellläufen werden für eine bestimmte Vorhersageweite (1, 3, 6 Stunden usw.) die entsprechenden Werte extrahiert (z. B. orangefarbene Punkte für die 1-h-Punktvorhersage) und mit den korrespondierenden Werten aus dem RADOLAN-RW-Produkt verglichen (Referenz).

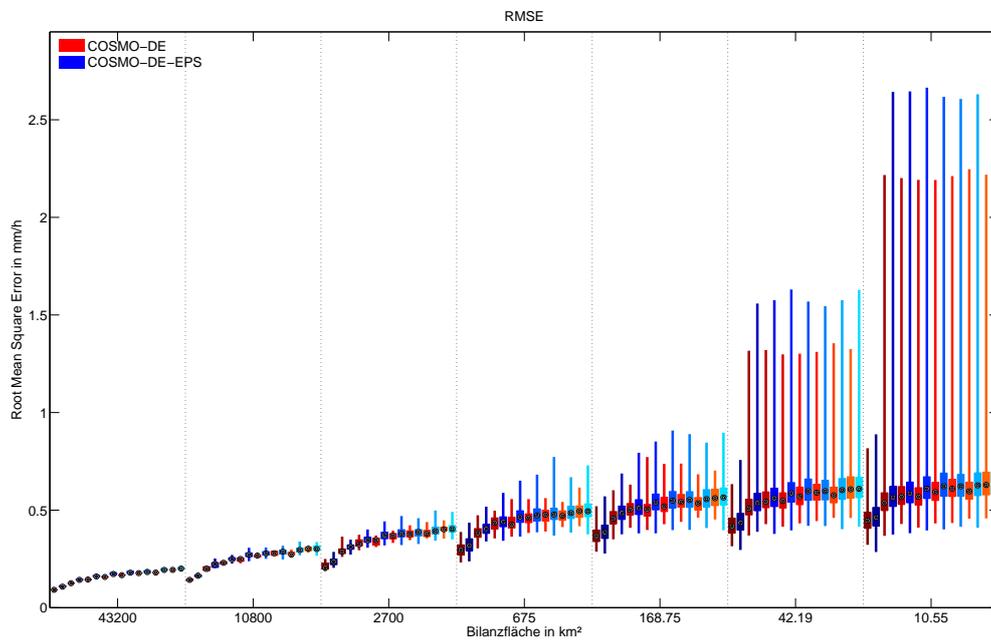


**Abbildung 7.3.2:** MAE für aus COSMO-DE bzw. COSMO-DE-EPS extrahierten stündliche Punktvorhersagen des Untersuchungszeitraumes 12/2010 bis 10/2015; Referenz: RADOLAN-RW. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die Ergebnisse für die Vorhersageweiten [1, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21] h (also nicht alle verfügbaren stündlichen Punktvorhersagen) dargestellt. Die für jede Bilanzgebietsklasse (43.200 bis 10,55 km<sup>2</sup>) gezeigten Boxplots sind dabei paarweise von links nach rechts, entsprechend der zugrunde liegenden, größer werdenden Vorhersageweite angeordnet. Dargestellt sind das Minimum, unteres Quartil, Median, oberes Quartil sowie das Maximum. Abbildung entnommen aus SCHÜTZE ET AL. (2016).

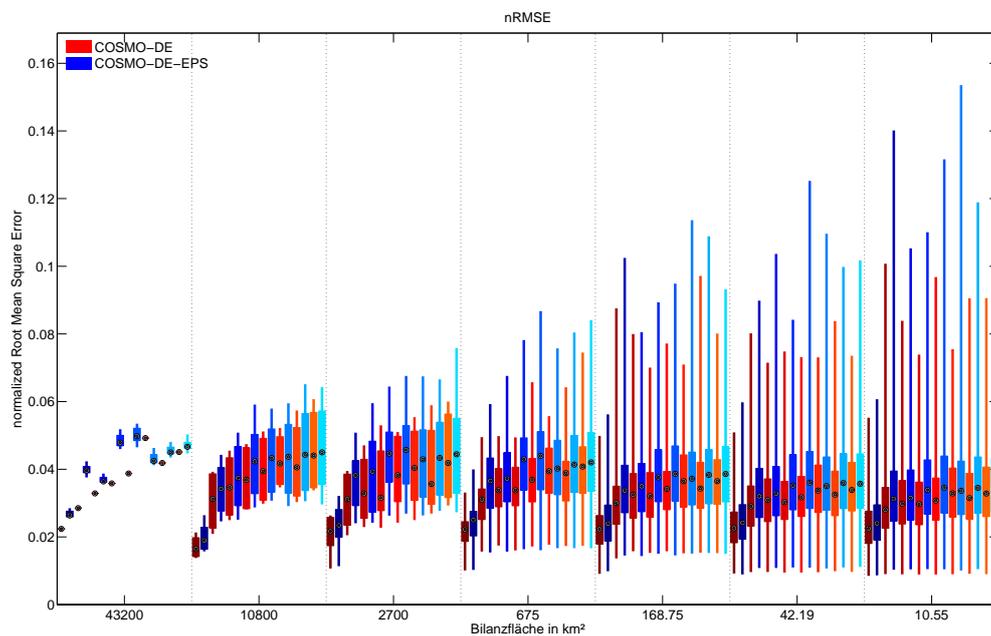
nicht vorhandenen Spread für die COSMO-DE-Ergebnisse wider; die für die COSMO-DE-EPS-Ergebnisse ersichtliche Streuung resultiert aus der gemeinsamen Auswertung aller Ensemble-Member. Für die höheren Teilungsstufen vergrößert sich – mit Blick auf beide untersuchte NWP-Produkte – die Anzahl der in die Bestimmung des MAE einbezogenen Werte durch eine Zunahme der Anzahl an Bilanzflächen. Der generell sehr ähnliche Spread bei beiden Produkten legt die Vermutung nahe, dass die Variabilität nicht aus der Ensemble-Variabilität des COSMO-DE-EPS herrührt, son-

dern durch räumliche Unterschiede des MAEs entsteht.<sup>1</sup> Erwartungsgemäß wächst der MAE mit zunehmender Vorhersageweite sowie mit abnehmender Bilanzflächengröße, wobei der generelle Verlauf für beide NWP-Produkte sehr ähnlich ist.

<sup>1</sup> Diese Vermutung bestätigt sich mit Blick auf Rang-Histogramme, welche das COSMO-DE-EPS als unterdispersiv identifizieren („U-Form“ der Rang-Histogramme; siehe dazu auch GEBHARDT ET AL., 2013 sowie BARTELS ET AL., 2016), worauf hierin aber nicht weiter eingegangen werden soll.



(a)



(b)

**Abbildung 7.3.3:** (a) RMSE und (b) nRMSE für aus COSMO-DE bzw. COSMO-DE-EPS extrahierten stündliche Punktvorhersagen des Untersuchungszeitraumes 12/2010 bis 10/2015; Referenz: RADOLAN-RW. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die Ergebnisse für die Vorhersageweiten [1, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21] h (also nicht alle verfügbaren stündlichen Punktvorhersagen) dargestellt. Die für jede Bilanzgebietsklasse (43.200 bis 10,55 km<sup>2</sup>) gezeigten Boxplots sind dabei paarweise von links nach rechts, entsprechend der zugrunde liegenden, größer werdenden Vorhersageweite angeordnet. Dargestellt sind das Minimum, unteres Quartil, Median, oberes Quartil sowie das Maximum. Abbildung entnommen aus SCHÜTZE ET AL. (2016).

### (Normalisierter) Root Mean Square Error (RMSE und nRMSE)

Ein ganz ähnliches Bild (Anwachsen des Fehlers mit zunehmender Vorhersageweite sowie mit abnehmender Bilanzgebietsgröße) zeigt sich für den RMSE (Abbildung 7.3.3 (a)). Normalisiert man die Fehler auf die tatsächlich innerhalb der flächengewichteten Zeitreihen aufgetretenen Maximalwerte, so zeigt sich ein etwas differenzierteres Bild (Abbildung 7.3.3 (b)); innerhalb einer Bilanzgebietsklasse wächst zunächst auch der nRMSE mit zunehmender Vorhersageweite an. Allerdings ist der nRMSE mit abnehmender Bilanzgebietsgröße rückläufig, was durch die tendenziell für kleinere Bilanzflächen höheren Niederschlagsintensitäten bedingt ist.

### Multiplicative Bias (mBIAS)

Das deterministische Gütemaß (Fehlermaß) des mBIAS gibt gewissermaßen die relative Abweichung der Produkte von der Referenz wieder. Auch hier (Abbildung 7.3.4) ist eine Zunahme des Fehlermaßes mit zunehmender Vorhersageweite sowie abnehmender Bilanzgebietsgröße ersichtlich. COSMO-DE zeigt dabei eine leichte Überschätzung gegenüber der Referenz über alle räumlichen Teilungsstufen sowie Vorhersageweiten hinweg. COSMO-DE-EPS hingegen zeigt ein sehr günstiges Verhalten, mit den Medianen der Fehlerverteilungen stets nahe einem Wert von  $mBIAS = 1$ . Schaut man sich die räumliche Verteilung des Gütemaßes an (Abbildung 7.3.5) so sind – wiederum bezogen auf die Radar-Referenz – im Flachland eher Bereiche von Unterschätzungen erkennbar. Im Mittelgebirge überschätzen die NWP-Produkte tendenziell das RADAR-QPE.<sup>1</sup> Weiterhin erkennbar in Abbildung 7.3.5 sind zwei für eine Verifikation nachteilige Effekte im Radar-QPE: Clutterfehler („Einsprengsel“), v. a. im Bereich Mittelsachsen (maßgeblich durch den Einfluss von Windkraftanlagen) sowie Inkonsistenzen durch Kompositierung (kreisbogenförmige Kanten) aus Daten unterschiedlicher Einzelradare.

### Area Under Curve (AUC)

Wie bereits ausgeführt (Abschnitt 2.4.3) kann die AUC sowohl deterministisch, als auch probabilistisch bestimmt

<sup>1</sup>Hier ist allerdings durchaus auch der Umkehrschluss zulässig, nämlich, dass das RADAR-QPE im Mittelgebirgsraum den realen und unbekanntem Niederschlag unterschätzt und die NWP-Produkte eigentlich besser performen, als anhand des Vergleichs gegenüber RADAR vermutet werden kann.

werden. Auch für ein Ensemble-Produkt ist eine deterministische Herangehensweise möglich. Jeder Member wird dabei als quasi-deterministische Vorhersage behandelt und die AUC bestimmt. Auf diese Weise erhält man mit den bisherigen Ergebnissen konsistente Befunde (siehe Abbildung 7.3.6). Setzt man als Grenze für eine gute Vorhersage einen AUC-Wert von 0,8 an,<sup>2</sup> so wird deutlich, dass mit den untersuchten NWP-Systemen eine gute Vorhersage mit einer Weite von 6 h (AUC-Wert von 0,8 oder höher) nur für Bilanzflächen bis maximal wenigen tausend Quadratkilometern zu erzielen ist; die AUC für die Bilanzgebietsgröße von 675 km<sup>2</sup> sinkt vielfach bereits unter einen Wert von 0,8 ab. Andererseits ist festzustellen, dass mit den untersuchten Produkten in der Mehrzahl der untersuchten Fälle (Interquartilabstand) zumindest eine passable Vorhersagegüte (AUC größer 0,7) erzielt werden kann, und zwar auch für größere Vorhersageweiten und/oder kleinere Bilanzgebiete.

## 7.3.2 Probabilistische Verifikation

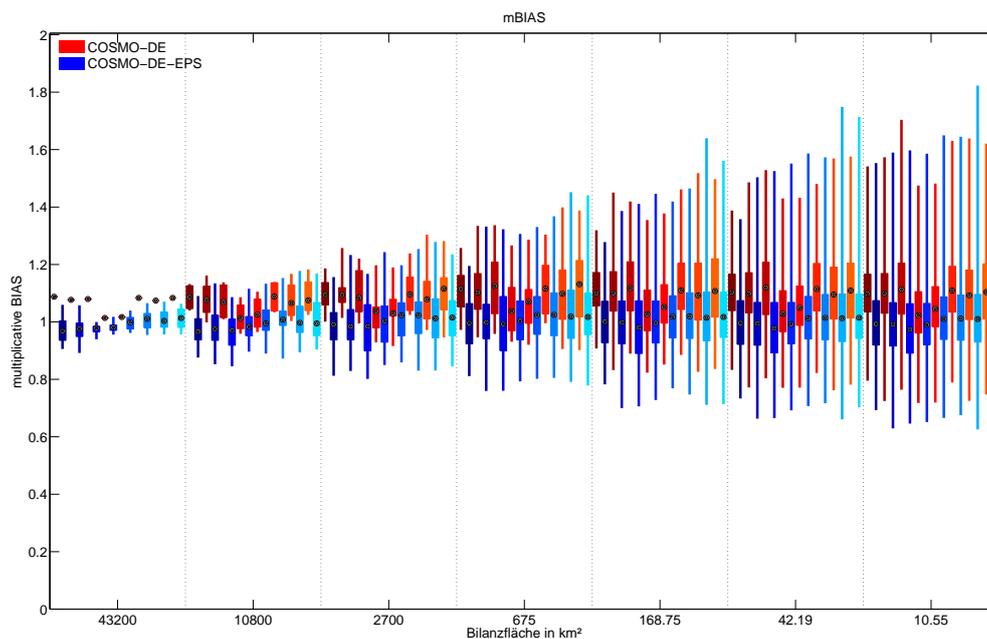
Wie bereits in Abschnitt 2.4.3 dargestellt, können – und sollten – Ensemble-Vorhersagen probabilistisch verifiziert werden. Die Basis dabei ist, die Vorhersagen hinsichtlich der darin enthaltenen Häufigkeitsverteilungen eines bestimmten *Ereignisses* zu bewerten. Mit anderen Worten: Es wird geprüft, wie gut die Statistik von Vorhersage und Beobachtung/Referenz übereinstimmt. Für das Niederschlagsvorhersageprodukt COSMO-DE-EPS wurden daher im Rahmen der vorgestellten Untersuchung die Maße AUCEPS, CRPS sowie Reliability-Diagramme ermittelt. Die Ergebnisse werden im Folgenden vorgestellt.

### Area Under Curve für das Ensemble-Produkt (AUCEPS)

Anders als bisher wurden für die Bestimmung der AUCEPS (probabilistische AUC für das Ensemble-Produkt) keine Punktvorhersagen, sondern aggregierte Vorhersagen (Niederschlagssummen) für die Vorhersagezeiträume 1–6, 7–12 sowie 13–18 h verwendet. Dieses Vorgehen basiert le-

<sup>2</sup>In der Literatur findet man vielfach die Bedeutung bestimmter AUC-Werte mit Blick auf den prädiktiven Nutzen der Vorhersage angegeben zu:

0,9 bis 1,0: sehr gut  
0,8 bis 0,9: gut  
0,7 bis 0,8: passabel  
0,6 bis 0,7: schwach  
0,5 bis 0,6: nicht signifikant ausgeprägt



**Abbildung 7.3.4:** mBIAS für aus COSMO-DE bzw. COSMO-DE-EPS extrahierten stündliche Punktvorhersagen des Untersuchungszeitraumes 12/2010 bis 10/2015; Referenz: RADOLAN-RW. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die Ergebnisse für die Vorhersageweiten [1, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21] h (also nicht alle verfügbaren stündlichen Punktvorhersagen) dargestellt. Die für jede Bilanzgebietsklasse (43.200 bis 10,55 km<sup>2</sup>) gezeigten Boxplots sind dabei paarweise von links nach rechts, entsprechend der zugrunde liegenden, größer werdenden Vorhersageweite angeordnet. Dargestellt sind das Minimum, unteres Quartil, Median, oberes Quartil sowie das Maximum. Abbildung entnommen aus SCHÜTZE ET AL. (2016).

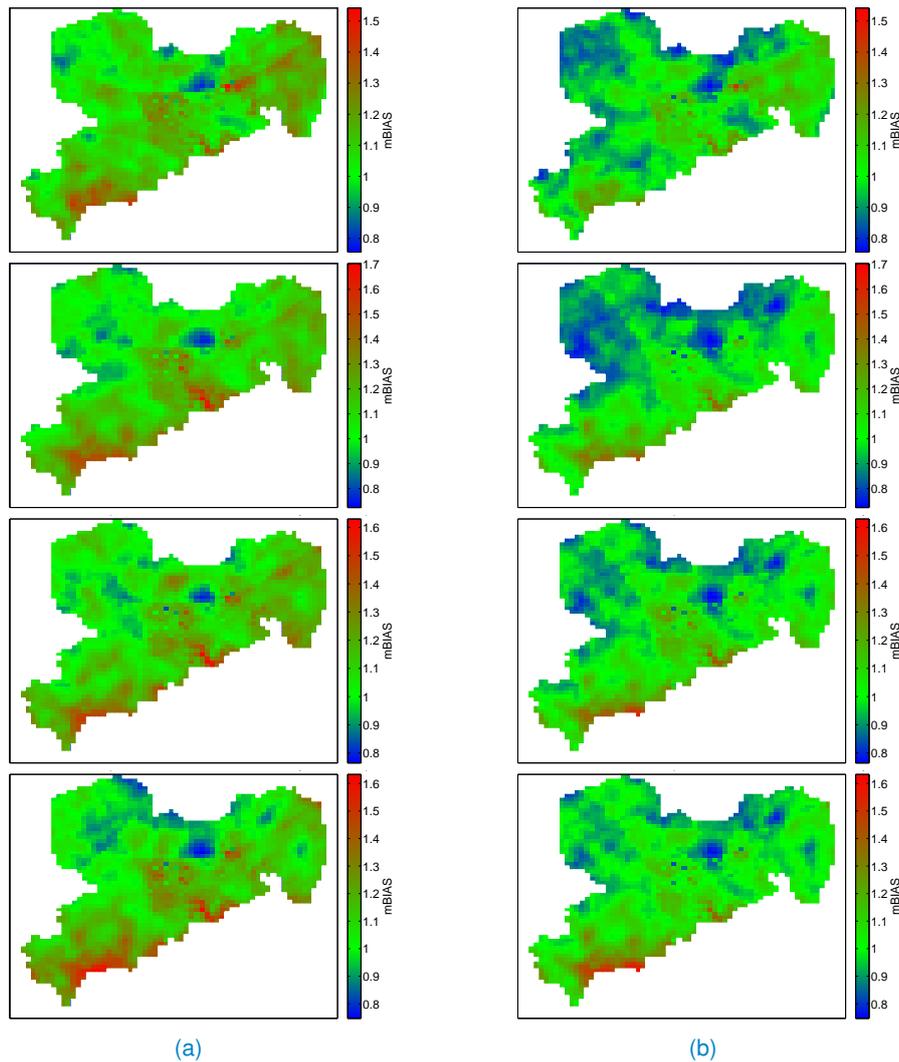
diglich auf pragmatischen Erwägungen (Darstellbarkeit) und nicht etwa auf spezifischen Anforderungen der Methodik zur Bestimmung der AUCEPS. Abbildung 7.3.7 zeigt die Ergebnisse. Konsistent mit den anhand der AUC für das COSMO-DE-EPS-Produkt getroffenen Aussagen, lässt sich zunächst feststellen, dass die Vorhersagegüte mit zunehmender Vorhersageweite sowie kleinerer Bilanzfläche sinkt. Diese Zusammenhänge sind am besten für kleinere Schwellenwerte (bis einschließlich 5 mm in 6 h) nachweisbar. Für größere Schwellenwerte werden die Stichproben schnell klein; die Werte der AUCEPS fluktuieren teilweise stark beziehungsweise lässt sich das Gütemaß aufgrund schwach- oder gar unbesetzter Stichproben nicht mehr bestimmen. Sichtbar ist dieser Effekt ab einem Schwellenwert von 15 mm in 6 h, beginnend bei größeren Bilanzflächen. Gleichsam führen – wiederum mit höheren Schwellenwerten – solche erratischen Stichprobeneffekte mitunter zu zunehmenden Güten bei größerem Vorhersagezeitraum.

Generell lässt sich feststellen, dass die AUCEPS für das COSMO-DE-EPS-Produkt auf eine sehr gute bis gute prädiktive Genauigkeit (Accuracy) bis einschließlich eines Schwellenwertes von 5 mm in 6 h über alle Bilanzflächengrößen hinweist. Für Schwellenwerte bis einschließlich

15 mm in 6 h sind mit Blick auf kleinere Bilanzflächen meist zumindest passable Genauigkeiten zu verzeichnen. Für größere, mit Blick auf kleinräumige Starkregenereignisse durchaus realistische Schwellenwerte (vergleiche dazu auch Abschnitt 3.1) erodiert die prädiktive Genauigkeit des NWP-Produkts und nähert sich schnell einem Wert von 0,5 an (ein Wert, den man durch bloßes „würfeln“ erhalten würde).

### Reliability-Diagramme

Die bereits auf der Grundlage der Ergebnisse für die AUCEPS erhaltenen Befunde lassen sich anhand der Reliability-Diagramme (siehe Abbildung 7.3.8; vergleiche dazu auch Abschnitt 2.4.3) bestätigen. Für die größte Bilanzflächeneinheit (43.200 km<sup>2</sup>; erster Subplot in Abbildung 7.3.8) lässt sich erkennen, dass die COSMO-DE-EPS-Vorhersage eine gute Vertrauenswürdigkeit (Reliability) aufweist (Linien im Diagramm nähern sich der Hauptdiagonale an). Fluktuationen in den Kurvenverläufen bzw. das Nichtvorhandensein der Kurven für höhere Schwellenwerte haben ihre Ursache in den dafür zugrunde gelegten gering- oder unbesetzten Stichproben. Die getroffenen Aussagen



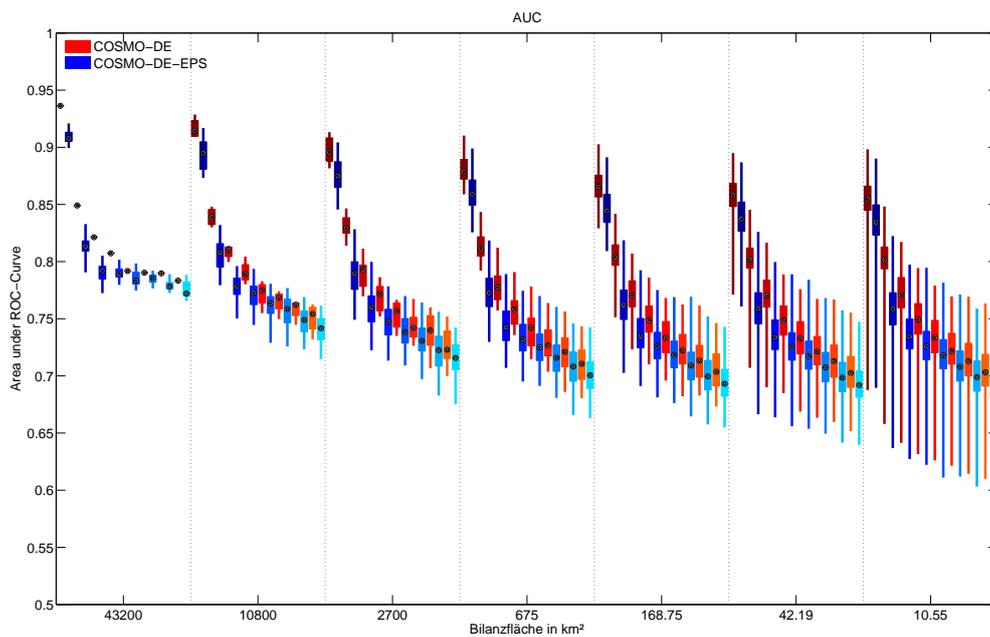
**Abbildung 7.3.5:** Räumliche Verteilung des mBIAS für (a) COSMO-DE und (b) COSMO-DE-EPS für die höchste räumliche Teilungsstufe (kleinste Bilanzgebietsgröße) für die Vorhersageweiten 1, 6, 15 und 21 h (zeilenweise). Für COSMO-DE-EPS ist der Mittelwert der mBIAS-Werte aller Ensemble-Member dargestellt. Abbildung entnommen aus SCHÜTZE ET AL. (2016).

gelten generell bis zu einer Bilanzflächengröße („Einzugsgebietsgröße“) von wenigen tausend Quadratkilometern.

Für kleinere Bilanzflächen lässt die Vertrauenswürdigkeit der Vorhersagen – insbesondere für größere Schwellenwerte – mehr und mehr nach, erkennbar an der Annäherung der Kurvenverläufe an die Abszisse der Diagramme. Für die kleinste Bilanzflächenklasse (10,55 km<sup>2</sup>) ist für Vorhersagen mit Schwellenwerten bis einschließlich 10 mm in 6 h noch eine gute Vertrauenswürdigkeit zu erkennen; für größer werdende Schwellenwerte nimmt sie allerdings schnell ab. Ab einem Schwellenwert von 50 mm in 6 h ist keine Vertrauenswürdigkeit der Vorhersage mit Blick auf die kleinste Bilanzflächeneinheit mehr gegeben.

### Continuous Ranked Probability Score (CRPS)

Das wichtigste Werkzeug zur Beurteilung der Eigenschaften einer probabilistischen Vorhersage ist der CRPS (vergleiche Abschnitt 2.4.3), da er integrale Aussagen zu Genauigkeit (Accuracy), Schärfe (Sharpness) und Dispersion (Spread) ermöglicht. Abbildung 7.3.9 zeigt Ergebnisse für den CRPS bezogen auf die Abhängigkeit des Maßes von der Vorhersageweite sowie der Größe des Bilanzgebietes. Da der CRPS anhand von Verteilungsfunktionen gebildet wird (stetige Funktion für ein probabilistisches Produkt, Stufenfunktion für ein deterministisches Produkt; vergleiche Abbildung 2.4.3), gibt es für die Auswertung hinsichtlich des Einheitsgebietes (43.200 km<sup>2</sup>) für beide NWP-Produkte keine Streuung in den CRPS-Werten. Die sich in den folgen-



**Abbildung 7.3.6:** Deterministische AUC für aus COSMO-DE bzw. COSMO-DE-EPS extrahierten stündliche Punktvorhersagen des Untersuchungszeitraumes 12/2010 bis 10/2015; Referenz: RADOLAN-RW. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die Ergebnisse für die Vorhersageweiten [1, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21] h (also nicht alle verfügbaren stündlichen Punktvorhersagen) dargestellt. Die für jede Bilanzgebietsklasse (43.200 bis 10,55 km<sup>2</sup>) gezeigten Boxplots sind dabei paarweise von links nach rechts, entsprechend der zugrunde liegenden, größer werdenden Vorhersageweite angeordnet. Dargestellt sind das Minimum, unteres Quartil, Median, oberes Quartil sowie das Maximum. Abbildung entnommen aus SCHÜTZE ET AL. (2016).

den Teilungsstufen herausbildenden Streuungen ergeben sich ausschließlich durch Bestimmung und Darstellung des CRPS für mehrere Bilanzgebiete.

Bestimmt man den CRPS für ein deterministisches Produkt (Stufenfunktion), so entspricht dieser dem MAE (vergleiche Abbildungen 7.3.9 mit 7.3.2 für COSMO-DE). Für Ensembles hingegen bildet der CRPS den prädiktiven Nutzen *integral* – und nicht für jeden Member einzeln – ab. Mit Blick auf Abbildung 7.3.9 ist zunächst interessant, dass – entsprechend der integralen Bewertung mittels CRPS – das COSMO-DE-EPS-Produkt besser performt als das deterministische COSMO-DE. Weiterhin ist auffällig, dass der CRPS für COSMO-DE-EPS weniger stark von der Vorhersageweite, als auch von der Größe des Bilanzgebiets abhängig ist. Für kleinere Bilanzgebiete (168,75 km<sup>2</sup> und kleiner) nimmt der CRPS, zumindest für Vorhersageweiten größer 3 h, einen fast gleichen Wert an. Interessant ist auch, dass sich der maßgeblich aus der räumlichen Varianz ergebende Spread der COSMO-DE-EPS-CRPS-Werte kleiner ist, verglichen mit den Ergebnissen für COSMO-DE.

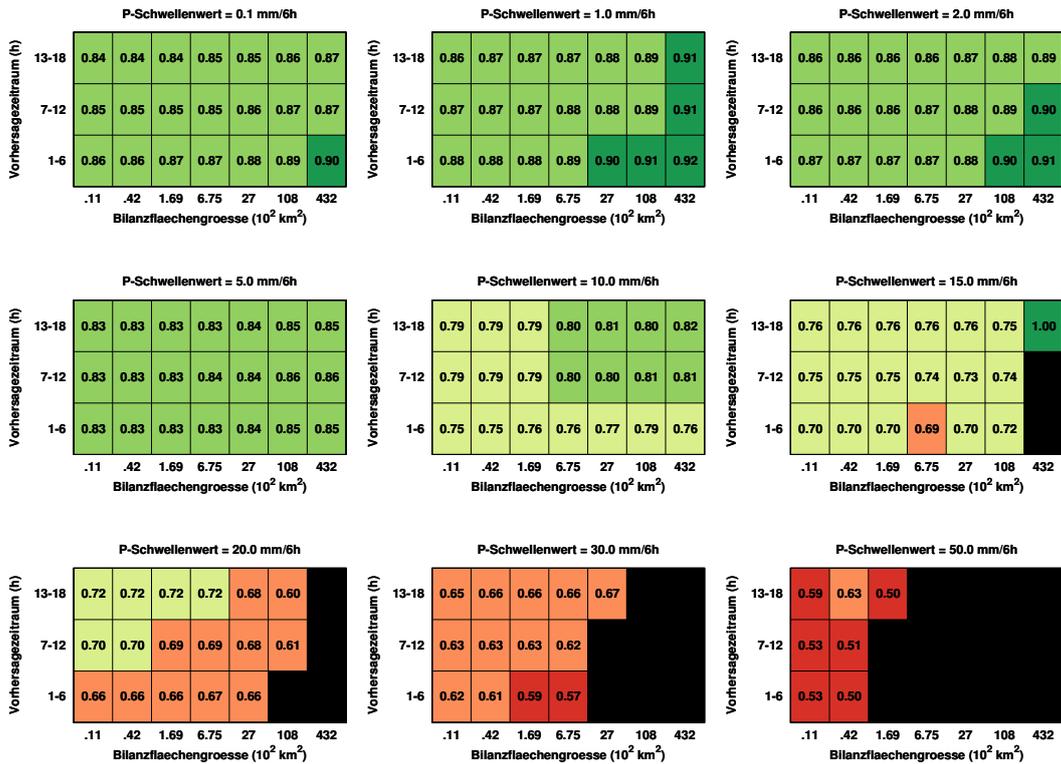
Räumlich gesehen zeigen sich – analog zu den Befunden beim mBIAS – wieder regionale Unterschiede hinsichtlich des CRPS, welcher erwartungsgemäß in Regionen mit

höheren Niederschlägen (und damit einer größeren Varianz) größer ausfällt, beispielsweise im Erzgebirge (siehe dazu Abbildung 7.3.10). Erneut lässt sich allerdings auch erkennen, dass sich aufgrund der Kürze der betrachteten Reihen (kurze operationelle Verfügbarkeit von COSMO-DE-EPS) Einzelereignisse klimatologisch durchprägen. Weiterhin sind wiederum Artefakte auszumachen, welche aus der Radar-Referenz stammen (Mittelsachsen).

**Schlussfolgerung 28:** *Generell zeigt sich ein Mehrwert probabilistischer Vorhersagen gegenüber deterministischen QPFs. Allerdings verblasst der prädiktive Nutzen von NWP-Produkten mit größeren (hochwasserrelevanten) Niederschlagsintensitäten. Für extreme und gleichzeitig kleinräumige Ereignisse (mehr als 50 Millimeter in 6 Stunden) ist kein deutlicher Nutzen durch NWP zu erwarten!* ♦

## 7.4 Diskussion

Verifiziert man probabilistische Niederschlagsvorhersagen mit einer deterministischen Herangehensweise, so verifiziert das probabilistische Produkt in der Regel schlechter.



**Abbildung 7.3.7:** AUCEPS (probabilistische AUC) für über 6 h aggregierte stündliche Vorhersagen (1 bis 6, 7 bis 12 sowie 13 bis 18 h) des COSMO-DE-EPS-Produkts in Abhängigkeit vom Niederschlagsschwellenwert (0,1 bis 50,0 mm in 6 h; Subplots oben links bis unten rechts) sowie der Bilanzflächengröße (10,55 bis 43.200 km<sup>2</sup>). Für die schwarzen Bereiche konnte aufgrund gering oder unbesetzter Stichproben keine Berechnung der AUCEPS erfolgen. Untersuchungszeitraum: 12/2010 bis 10/2015.

**Tabelle 7.4.1:** Vergleich der Verifikationsergebnisse für verschiedene Maßzahlen mit Blick auf die Überlegenheit (✓) eines bestimmten NWP-Produktes (am Beispiel vom COSMO-DE und COSMO-DE-EPS).

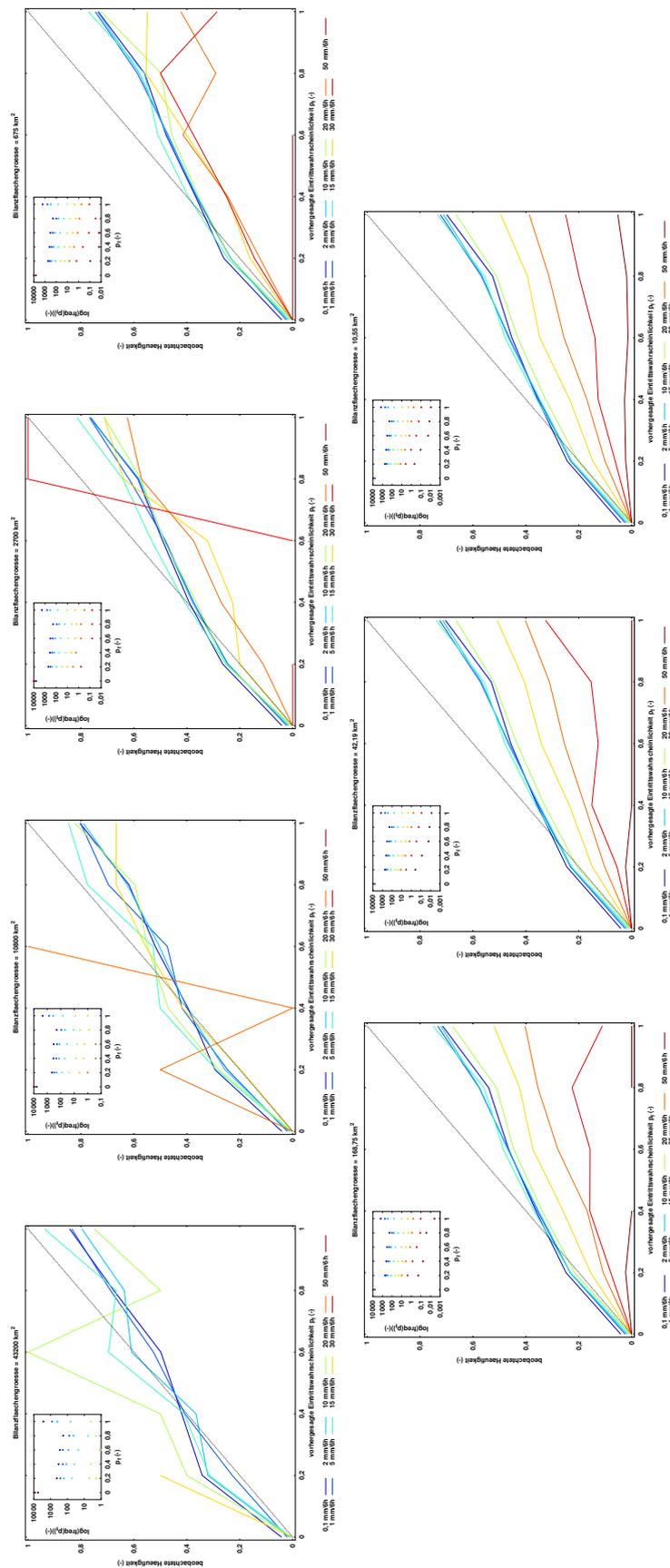
Eigenschaft	Maßzahl	COSMO-DE	COSMO-DE-EPS
Genauigkeit (Accuracy)	CRPS	✗	✓
Verzerrung (Bias)	mBIAS	✗	✓
Vertrauenswürdigkeit (Reliability)	Rel.-Diagramm	–	– <sup>§</sup>
Schärfe (Sharpness)	CRPS	✗	✓
Dispersion (Spread)	CRPS	✗	✓
Gesamtbewertung:		✗	✓

<sup>§</sup>Vergleich kann nicht gezogen werden, da Reliability-Diagramme für deterministische Vorhersagen nicht erstellbar sind (siehe Abschnitt 2.4.3).

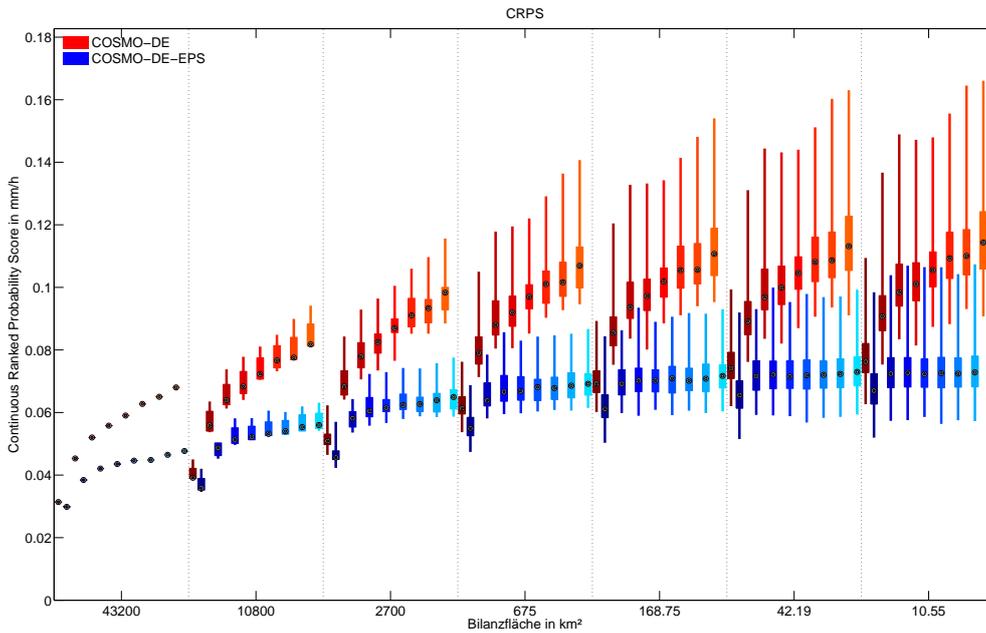
Das ist insofern nicht verwunderlich, da eine Ensemblevorhersage im Gegensatz zu einer bestimmten deterministischen Vorhersage einen Spread aufweist (und damit die Wahrscheinlichkeit steigt, dass der vorhergesagte Wert vom Referenz-Wert weiter entfernt liegt). Zu beobachten ist dieser Effekt beispielsweise anhand des Verlaufs von MAE und (n)RMSE in Abhängigkeit von Vorhersageweite und Bilanzgebietsgröße (siehe Abbildungen 7.3.2 und 7.3.3).

Betrachtet man hingegen ein Ensemble als eine anhand der Häufigkeit der enthaltenen Werte konditionierte

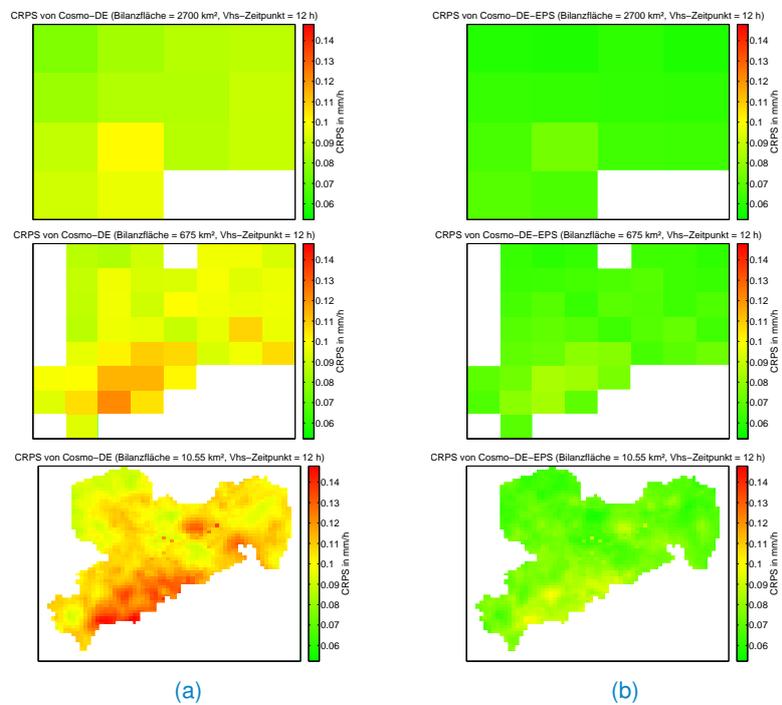
Vorhersage und verifiziert entsprechend (siehe Abschnitt 7.3.2), so verifiziert das Ensemble-Produkt möglicherweise besser als ein deterministisches Produkt. Im vorliegenden Fall – dem Vergleich der Vorhersagegüte vom COSMO-DE und COSMO-DE-EPS – trifft dies zu, wie die Auswertung in Tabelle 7.4.1 belegt. Im Umkehrschluss bedeutet das allerdings auch, dass dieser prädiktive Mehrwert nur dann zum Tragen kommen kann, wenn das Ensemble auch probabilistisch (also häufigkeitsorientiert) verarbeitet wird (siehe Abschnitt 2.5), wobei dann wiederum entsprechende Vor-



**Abbildung 7.3-8:** Reliability-Diagramme für das NWP-Produkt COSMO-DE-EPS (Untersuchungszeitraum: 12/2010 bis 10/2015) für sieben (abnehmende) Bilanzflächengrößen von 43.200 bis 10,55 km<sup>2</sup> und diverse Schwellenwerte des 6-h-Niederschlags.



**Abbildung 7.3.9:** CRPS für aus COSMO-DE bzw. COSMO-DE-EPS extrahierten stündliche Punktvorhersagen des Untersuchungszeitraumes 12/2010 bis 10/2015; Referenz: RADOLAN-RW. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die Ergebnisse für die Vorhersageweiten [1, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21] h (also nicht alle verfügbaren stündlichen Punktvorhersagen) dargestellt. Die für jede Bilanzgebietsklasse (43.200 bis 10,55 km<sup>2</sup>) gezeigten Boxplots sind dabei paarweise von links nach rechts, entsprechend der zugrunde liegenden, größer werdenden Vorhersageweite angeordnet. Dargestellt sind das Minimum, unteres Quartil, Median, oberes Quartil sowie das Maximum. Abbildung entnommen aus SCHÜTZE ET AL. (2016).



**Abbildung 7.3.10:** Räumliche Verteilung des CRPS für (a) COSMO-DE und (b) COSMO-DE-EPS für die räumlichen Teilungsstufe 3, 4 und 7 (Bilanzgebietsgröße 2.700, 675 und 10,55 km<sup>2</sup>; zeilenweise) für die Vorhersageweite 12 h. Es sind nur jene Bilanzgebiete dargestellt, welche Anteil an der Landesfläche von Sachsen haben. Für COSMO-DE-EPS ist der Mittelwert der CRPS-Werte aller Ensemble-Member dargestellt. Abbildung entnommen aus SCHÜTZE ET AL. (2016).

**Tabelle 7.4.2:** Gegenüberstellung von Vor- und Nachteilen bei der Verarbeitung deterministischer und probabilistischer quantitativer Niederschlagsvorhersagen im Rahmen der Hochwasserfrühwarnung.

	Vorteile	Nachteile
Deterministische QPF	Geringerer Datenanfall	Geringerer prädiktiver Nutzen
	Geringerer methodischer Aufwand	Güten stark abhängig von Bilanzgebietsgröße
	Geringerer technischer Aufwand	Keine Wahrscheinlichkeitsaussagen <sup>§</sup>
	Geradlinige Verarbeitung und Kommunikation	Kein Nutzen für extreme Niederschläge
Probabilistische QPF	Höherer prädiktiver Nutzen	Hoher Datenanfall
	Stabile Güten für kleine Bilanzgebiete	Erhöhter methodischer Aufwand
	Wahrscheinlichkeiten angebar <sup>§</sup>	Hoher technischer Aufwand (Folgeverfahren!)
		Frage der Kommunikation von Unsicherheiten
		Kein Nutzen für extreme Niederschläge

<sup>§</sup>Erst durch Wahrscheinlichkeiten ist ein Risiko quantifizierbar (vergleiche Abschnitt 1.2); streng genommen erfordert ein „Hochwasserrisikomanagement“ dem Wortsinne nach also *zwingend* die Ableitung und Kommunikation von Wahrscheinlichkeiten.

und Nachteile eine Rolle spielen (siehe Tabelle 7.4.2)! Die Entscheidung für oder wider die Verarbeitung probabilistischer QPF im Rahmen der Hochwasserfrühwarnung hängt also nicht ausschließlich vom prädiktiven Nutzen, sondern auch von weiteren Faktoren (wie dem operationellen Aufwand) ab. Weiterführende Auswertungen und Abbildungen zur hierin vorgestellten Verifikationsstudie finden sich in SCHÜTZE ET AL. (2016).

**Schlussfolgerung 29:** Für vergleichbare Modellsetups (z. B. COSMO-DE und -EPS) verifiziert das probabilistische Produkt besser, hat also gegenüber einer deterministischen Niederschlagsvorhersage einen größeren prädiktiven Nutzen. Dieser Mehrwert ist allerdings nur dann gegeben, wenn das probabilistische Produkt auch mit den entsprechenden Techniken verarbeitet wird. Größere Genauigkeit im deterministischen Sinne und eine probabilistische Betrachtung der Vorhersagen gehen also Hand in Hand! ❖

# 8 Vergleichende Bewertung hydrologischer Modellansätze zur Ableitung von Frühwarnprodukten

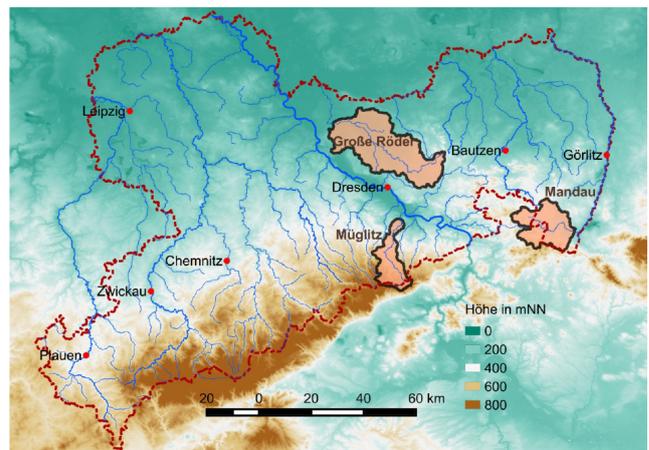
Eine wichtige Anforderung an eine Hochwasserfrühwarnung ist, dass diese auch und vor allem für kleine, in der Regel unbeobachtete Einzugsgebiete einen prädiktiven Nutzen bietet. Es stellt sich die Frage, welcher hydrologische Modellansatz für die Ableitung von Frühwarninformationen oder -produkten geeignet ist. Diese Frage soll – unter verschiedenen Prämissen – im Folgenden untersucht und beantwortet werden. Bezogen auf den Meilensteinplan des Gesamtprojekts (Tabelle 3.4.2) handelt es sich bei den dargestellten Untersuchungen um die Meilensteine 3, 4, 6 und 8. Die dafür relevanten Berichte/Dokumentationen, welche während der Projektlaufzeit erstellt wurden, sind SCHWARZE ET AL. (2015) und SCHÜTZE ET AL. (2017).

## 8.1 Grundlagen und methodisches Vorgehen bei der hydrologischen Modellierung

Die gewählte Untersuchungsmethodik soll zum einen ein geeignetes Setup bieten, um die Frage zu beantworten, welcher hydrologische Modellansatz für die Ableitung von Produkten zur Hochwasserfrühwarnung geeignet ist. Weiterhin erlaubt die Untersuchung aufgrund der vergleichsweise hohen Anzahl einbezogener Einzugsgebiete Aussagen zur regionalen Gültigkeit und Übertragbarkeit von Modellansätzen, vor allem mit Blick auf unbepegelte, kleine Gebiete.

### 8.1.1 Auswahl der Untersuchungsgebiete

Die zweistufige Untersuchung fokussierte zunächst auf 14 Pegelinzugsgebiete in 3 Flussgebieten. Abbildung 8.1.1 und Tabelle 8.1.1 bieten dazu eine Übersicht. In der zweiten Phase wurde die Untersuchungsmethodik für weitere 50 Pegelinzugsgebiete in 24 Flussgebieten Sachsens an-



**Abbildung 8.1.1:** Übersicht der in der ersten Stufe der Studie untersuchten Gebiete (Abbildung entnommen aus SCHWARZE ET AL., 2015).

gewendet, um eine möglichst repräsentative Abdeckung des Freistaats mit Ergebnissen zu gewährleisten (Abbildung 8.1.2 und Tabellen 8.1.2 und 8.1.3). Die Abbildung 8.1.3 zeigt ein Histogramm der Einzugsgebietsgrößen. Die Einzugsgebiete wurden im Hinblick auf eine gute räumliche Abdeckung und ein möglichst breites Sampling der maßgeblichen naturräumlichen, morphologischen und geologischen Einheiten ausgewählt. Des Weiteren gelten die Messwerte der ausgewählten Pegel als relativ sicher und sind nicht durch Rückstau oder Unsicherheiten der Schlüsselkurve beeinflusst.

### 8.1.2 Datensituation

Eine der Gebietsauswahl aus Abschnitt 8.1.1 zugrunde liegende Vorbedingung war die Verfügbarkeit hinreichend belastbarer Pegelraten. Einige der gelisteten Pegel weisen Reihenlängen von über 100 Jahren auf (z. B. Dohna); üblicherweise liegen zeitlich hoch aufgelöste Pegelraten (Stundenwerte) aber frühestens ab den 1990er-Jahren vor,

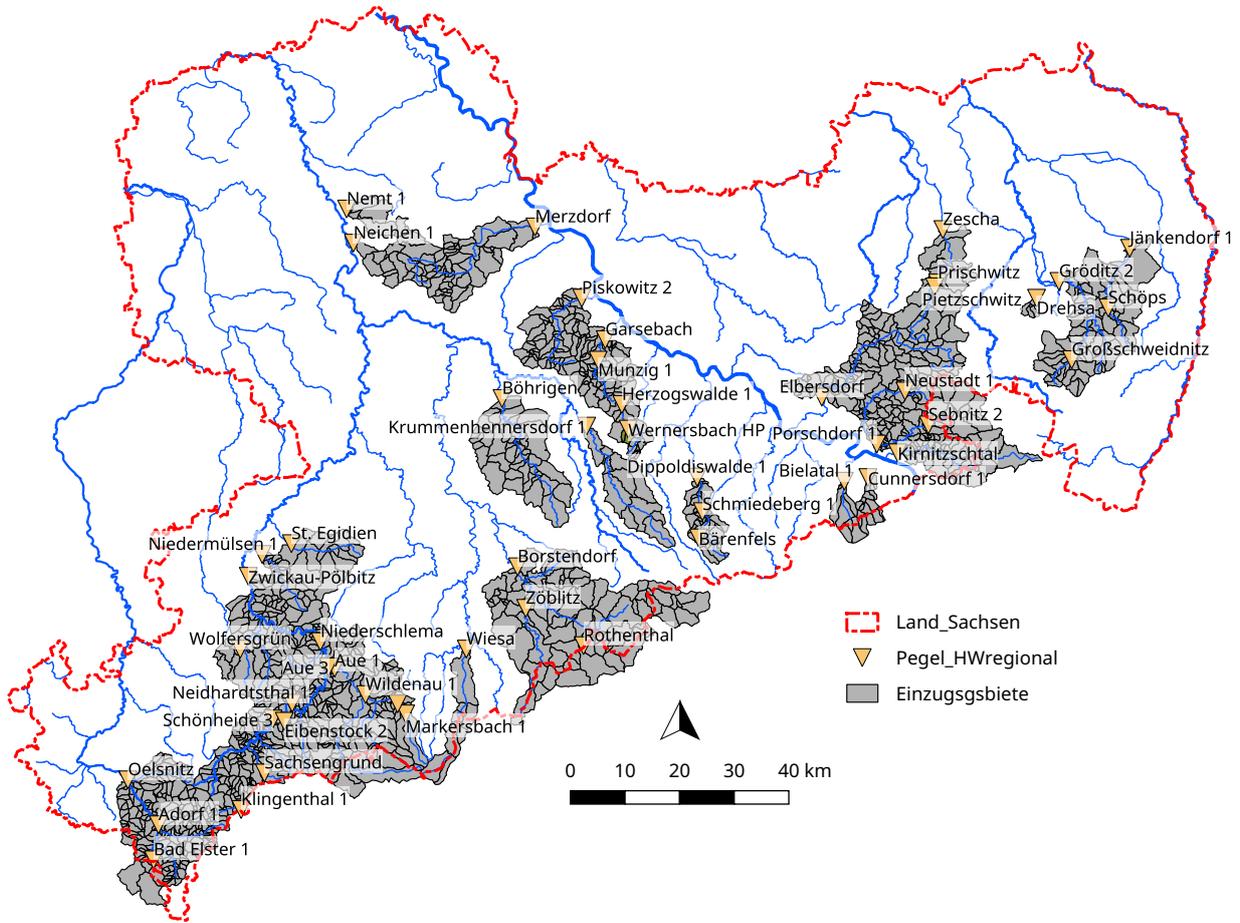


Abbildung 8.1.2: Übersicht der in die zweite Phase der Untersuchung einbezogenen Gebiete (Abbildung entnommen aus SCHÜTZE ET AL., 2017).

Tabelle 8.1.1: Gebietsübersicht I/III (Gebiete der ersten Stufe der Studie; innerhalb eines Flussgebiets sortiert nach Einzugsgebietsgröße  $A_E$ ; Flächenangaben gerundet).

Flussgebiet	Nr.	Pegel	$A_E$ (km <sup>2</sup> )	Naturraum	Morphologie	Geologie
Müglitz	1	Geising 1	26	Osterzgebirge	Mittelgebirge	Magmatisches Ergussgestein
	2	Lauenstein OP/ZP	27			
	3	Lauenstein UP	37			
	4	Lauenstein 1/3	76			
	5	Dohna	199			
Mandau	6	Niederoderwitz	29	Lausitzer Bergland	Mittelgebirgs-vorland und Mittelgebirge	Magmatisches Tiefen-gestein
	7	Seifhennersdorf	75			
	8	Großschönau 2	162			
	9	Zittau 2/5	296			
	10	Zittau 3 <sup>§</sup>	–			
Große Röder	11	Radeburg 3	73	Großenhainer Pflege	Flachland und Hügelland	Magmatisches Tiefen-gestein
	12	Radeberg	114			
	13	Großdittmannsdorf	299			
	14	Kleinraschütz	679			

⋮

<sup>§</sup>Erfasst die Umflut des Pegels Zittau 5 (Hospitalmühlgraben).

**Tabelle 8.1.2:** Gebietsübersicht II/III (flächendeckende Studie; innerhalb eines Flussgebiets sortiert nach Einzugsgebietsgröße  $A_E$ ; Flächenangaben gerundet).

Flussgebiet	Nr.	Pegel	$A_E$ (km <sup>2</sup> )	Naturraum	Morphologie	Geologie
Hoyerswerdaer	15	Pietzschwitz	42	Oberlausitzer	Flach-	Locker-
Schwarz-	16	Prischwitz	104	Heide- und	land	gestein
wasser	17	Zescha	181	Teichlandschaft		
Mühlbach	18	Nemt 1	57	Lomm. Pflege	Flachland	Lockergestein
Mutzschener	19	Neichen 1	46	Lommatzcher	Flach-	Locker-
Wasser				Pflege	land	gestein
Döllnitz	20	Merzdorf	211	Lomm. Pflege	Flachland	Lockergestein
Ketzerbach	21	Piskowitz 2	157	Lomm. Pflege	Flachland	Löss
Rote	22	Bärenfels	6	Osterz-	Mittel-	Magmatisches
Weißeritz	23	Schmiedeberg 1	47	gebirge	gebirge	Ergussgestein
	24	Dippoldis-	73			Metamorphite,
		walde 1 + 3				Gneis
Triebisch	25	Wernersbach	5	Zwischen	Mittelgeb.-	Magmatisches
	26	Herzogswalde 1	47	Lommatzcher	vorland	Ergussgestein
	27	Munzig	115	Pflege und		Misch-
	28	Garsebach	165	Osterzgebirge		geologie
Flöha	29	Rothenthal	76	Mittleres	Mittel-	Meta-
	30	Zöblitz	125	Erzgebirge	gebirge	morphite,
	31	Borstendorf	640			Gneis
Wesenitz	32	Elbersdorf	277	Zw. Lausitzer	Mittelgeb.	Magmatisches
				Bergland u. Elb-	bis	Tiefen-
				sandsteingeb.	-vorland	gestein
Lachsbach	33	Neustadt 1	40	Zw. Lausitzer	Mittel-	Magmatisches
	34	Sebnitz 2	102	Bergland und	gebirgs-	Tiefen-
	35	Porschdorf 1	268	Muskauer Heide	vorland	gestein
Schwarzer	36	Schöps	43	Zw. Laus. Bergl.	Mittelgeb.-	Magmatisches
Schöps	37	Jänkendorf	125	u. Musk. Heide	vorland	Tiefengestein
Drehsaer	38	Drehsa	7	Ober-	Mittelgeb.-	Magmatisches
Wasser				lausitz	vorland	Tiefengestein
Löbauer	39	Großschweidnitz	42	Ober-	Mittelgeb.-	Magmatisches
Wasser	40	Gröditz 1/2	203	lausitz	vorland	Tiefengestein
Pöhlbach	41	Wiesa	86	Mittleres	Mittelgeb.-	Metamorphite,
				Erzgebirge	vorland	Gneis
Große	42	Böhrigen	253	Mittleres	Mittelgeb.-	Metamorphite,
Striegis				Erzgebirge	vorland	Gneis
Bobritzsch	43	Krummen-	131	Mittleres bis	Mittel-	Metamorphite,
		hennersdorf 1		Osterzgebirge	gebirge	Gneis

als die Pegel nach und nach mit elektronischer Messwertfassung und Datenfernübertragung ausgerüstet wurden. Teilweise sind zeitlich hoch aufgelöste Werte aus digitalisierten Pegelbögen vorhanden.

Neben Durchflussdaten sind für die hydrologische Modellierung potentiell noch eine Vielzahl weiterer Daten notwendig, beispielsweise Reliefinformationen, Bodendaten, Landnutzungsdaten, meteorologische Daten etc. Hier konn-

te auf den reichhaltigen Bestand aufbereiteter Daten aus dem LfULG-KliWES-Projekt<sup>1</sup> (SCHWARZE ET AL., 2014) zurückgegriffen werden. Aus Gründen der Kürze wird hier auf den zitierten KliWES-Projektbericht verwiesen. Tabelle 8.1.4 liefert eine Übersicht der Datengrundlage; auf weiter-

<sup>1</sup> Siehe <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/23236>

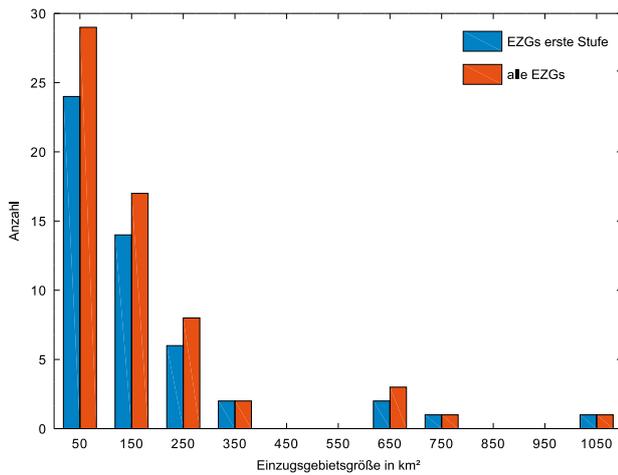
**Tabelle 8.1.3:** Gebietsübersicht III/III (flächendeckende Studie; innerhalb eines Flussgebiets sortiert nach Einzugsgebietsgröße  $A_E$ ; Flächenangaben gerundet).

Flussgebiet	Nr.	Pegel	$A_E$ (km <sup>2</sup> )	Naturraum	Morphologie	Geologie
				⋮		
Weiße Elster	44	Bad Elster 1	48	Vogtland	Mittelgebirge	Metamorphite und Schiefer
	45	Adorf (1)	170			
	46	Oelsnitz	328			
Zwota	47	Klingenthal 1	59	Vogtland	Mittelgebirge	Metamorphite, Schiefer
Lungwitzbach	48	St. Egidien	122	Mittleres Erzgebirge	Mittelgebirge	Rotliegendes, Molasse
Mülsenbach	49	Niedermülsen 1	50	Mittleres Erzgebirge	Mittelgebirgsvorland	Rotliegendes, Molasse
Kirnitzsch	50	Kirnitzschtal	154	Elbsandsteingeb.	Mittelgebirge	Sandstein
Biela	51	Bielatal 1	38	Elbsandsteingeb.	Mittelgebirge	Sandstein
Cunnersdorfer Bach	52	Cunnersdorf 1	29	Elbsandsteingebirge	Mittelgebirge	Sandstein
Große Pyra	53	Sachsengrund	6	Westerzgebirge	Mittelgebirge	Magmatisches Tiefengestein
Rähmerbach	54	Eibenstock 2	14	Westerzgebirge		Magmatisches Tiefengestein
Zwickauer Mulde	55	Schönheide	149	Westerzgebirge	Mittelgebirge	Magmatisches Tiefengestein
	56	Neidhardtsthal 1	204			
	57	Aue 3	682			
	58	Niederschlema	754			
	59	Zwickau-Pölbitz	1.021			
Große Mittweida	60	Markersbach 1	31	Westerzgebirge	Mittelgebirge	Metamorphite, Schiefer
	61	Markersbach 2	37			
	62	Wildenau 1	166			
Schwarzwasser	63	Aue 1	363	Westerzgebirge	Mittelgebirge	Magmatisches Tiefengestein
Hirschfelder Wasser	64	Wolfersgrün	22	Westerzgebirge	Mittelgebirgsvorland	Magmatisches Tiefengestein

**Tabelle 8.1.4:** Übersicht der bei der vergleichenden hydrologischen Modellierung einbezogenen Daten.

Datenart	Produkt	Bereitsteller
Hydrologische Daten	Pegeldaten	LfULG
Meteorologische Daten	Stationsdaten, Felddaten (Radar, Vorhersagen)	DWD
Einzugsgebiete und Fließgewässer	Amtliches Gewässernetz	LfULG
Reliefinformationen	DGM25, ASTER <sup>§</sup>	GeoSN, NASA
Bodeneigenschaften	BKkonz25*, KA5 <sup>#</sup>	LfULG, AG Boden
Landnutzung	CORINE Land Cover	EEA <sup>~</sup>

<sup>§</sup>Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer – liefert Höhenmodell aus Satellitenfernerkundung; \*Bodenkonzeptkarte 1 : 25.000; <sup>#</sup>Bodenkundliche Kartieranleitung; <sup>~</sup>European Environment Agency.



**Abbildung 8.1.3:** Histogramm der Einzugsgebietsgrößen der untersuchten Gebiete (Abbildung verändert nach SCHÜTZE ET AL., 2017).

führende Erläuterungen und Referenzierung soll im Rahmen dieses Werkes ebenfalls verzichtet werden.

### 8.1.3 Vorstellung der untersuchten Modellansätze<sup>1</sup>

Für die Untersuchungsgebiete wurden drei unterschiedliche hydrologische Modellkonzepte implementiert und angewendet: erstens, ein knotenbasiertes deterministisches Modell (DeHM), zweitens, ein datengetriebenes, künstliches neuronales Netz (DaHM) und drittens, ein einfaches Klassifikationsmodell als Bewertungsverfahren der Hochwasseranfälligkeit (ScoHM). Details zu DeHM und DaHM finden sich in SCHWARZE ET AL. (2015), zu ScoHM bei METZKES (2016). Die Ansätze sollen im Folgenden kurz vorgestellt werden.

#### Deterministische hydrologische Modellierung (DeHM)

Die Modell-Topologie des DeHM beruht auf einer knotenbasierten Repräsentation der Teileinzugsgebiete. Die Berechnungen beziehen sich zunächst auf jeden Knoten und werden dann sequentiell gemäß der topologischen Reihenfolge der Knoten zusammengefasst; jeder Modellknoten erhält dabei alle relevanten Modellparameter. Die Abflussbildung wird über das SCS-Verfahren (USDA, 1986) realisiert. Die Abflusskonzentration wird über eine Einzellinearspeicherkaskade oder über eine Impulsantwortfunktion mo-

delliert. Der Wellenablauf im Gerinne ist über Translationsglieder, eine Einzellinearspeicherkaskade, die Muskingum-Methode oder ein Translations-Diffusions-Modell beschrieben (zu den systemhydrologischen Ansätzen siehe bspw. DYCK, 1978). Da sich in den Untersuchungsgebieten Mehrzweckspeicher und Hochwasserrückhaltebecken befinden, wird deren Bewirtschaftung im Modell explizit berücksichtigt.

Die Kalibrierung erfolgte ereignisbasiert auf Grundlage maskierter Durchfluss-Ganglinien und monokriteriell unter der Verwendung eines gemischten Gütemaßes nach LI ET AL. (2015) mittels des CMA-ES-Algorithmus (Covariance Matrix Adaption Evolution Strategy; HANSEN & OSTERMEIER, 2001). Die Datenassimilation wurde mittels eines Kalman-Filter-Ansatzes nach BLÖSCHL ET AL. (2014) umgesetzt. Weitere Informationen hinsichtlich des Modells DeHM finden sich in SCHWARZE ET AL. (2015).

#### Datengetriebene hydrologische Modellierung (DaHM)

DaHM ist ein künstliches neuronales Netz, konkret ein zweischichtiges Feedforward-Perzeptron (HAGAN ET AL., 2002) mit Hidden Layer (versteckter Schicht). Der Eingangsvektor  $\mathcal{J}$  umfasst stündliche Durchfluss-, Niederschlags- und kumulierte Niederschlagsdaten in der allgemeinen 15-Elemente-Form:

$$\mathcal{J} : Q_{t-[0...3]}; P_{t-[0...3]}; P_{t-[0...6]}^c \quad (8.1.1)$$

mit Stundendaten des Durchflusses  $Q$ , dem Stundenniederschlag  $P$  und dem kumulierten Stundenniederschlag  $P^c$ .

Darüber hinaus werden, abhängig den Vorhersageweiten im Vorhersagefall, Eingabedaten mit Niederschlagsvorhersagen berücksichtigt. Für die Vorhersage von  $Q_{t+6}$  wird beispielsweise  $P_{t+6}$  und für die Vorhersage  $Q_{t+12}$  werden  $P_{t+6;t+12}$  berücksichtigt, wobei die  $P_{t+x}$ -Werte spezifische QPFs darstellen; es wird also für jede Vorhersageweite (6, 12, 18, 21, 24 und 36 h) ein dediziertes Netz trainiert. Zum Netzwerktraining wurde der Levenberg-Marquardt-Algorithmus verwendet (MORÉ, 1978). Als Eingangsdaten für das Modelltraining dienten ereignisbasiert maskierte Durchflussganglinien und stündliche Niederschlagsbeobachtungen. Für verschiedene Neuronenkonfigurationen in der verdeckten Schicht wurden jeweils 15 Trainingsläufe evaluiert und für jede  $Q_{t+x}$ -Vorhersage das Netzwerk mit der höchsten Güte ausgewählt. Die Anzahl der Neuronen

<sup>1</sup>Entnommen aus KERL ET AL. (2016).

in der verdeckten Schicht variierte dabei zwischen 2 und 13. Die Rechenzeit für das Netztraining (bezogen auf alle betrachteten Pegel und Vorhersagehorizonte) beträgt auf einem Arbeitsplatzrechner etwa 3,5 Stunden. Für weitere Informationen zu DaHM, siehe SCHWARZE ET AL. (2015) und SCHÜTZE ET AL. (2017).

### Hydrologische Modellierung auf Basis von Bewertungsverfahren der Hochwasseranfälligkeit (ScoHM)

Das Klassifikationsmodell ScoHM (METZKES, 2016) ähnelt dem Ermittlungsverfahren der Hochwasserdisposition nach COLLIER & FOX (2003), einem Bewertungsverfahren der Hochwasseranfälligkeit (FSAP, siehe Abschnitt 2.2.3). Generell ist der Ansatz zweigeteilt. Erstens wird die statische Disposition eines Einzugsgebietes anhand morphologischer Eigenschaften, wie beispielsweise der Hangneigung oder der Landnutzung, abgeleitet. Zweitens wird die zeitlich variable Disposition des Einzugsgebietes anhand des standardisierten Niederschlagsindex (Standardized Precipitation Index – SPI; EDWARDS & MCKEE, 1997), kumulierter Niederschlagshöhen sowie anhand der Abgabe eines mit stündlichem Niederschlag beaufschlagten Einzellinearspeichers ermittelt.

Die ursprünglich von METZKES (2016) vorgeschlagene Klassifikationsmethodik ist in Tabelle 8.1.5 dargestellt; die Teilscores der Grunddisposition sind linear auf die Spannweite der entsprechenden morphologischen Informationen abgebildet. Die Teilscores der dynamischen Disposition beziehen sich hingegen teilweise auf spezifische Perzentile, welche aus den Häufigkeitsverteilungen der entsprechenden Eingangsdaten, wie beispielsweise dem siebentägigen kumulierten Niederschlag, ermittelt wurden. Die in Tabelle 8.1.5 aufgeführten Teilscores der dynamischen Disposition stellen das beste Ergebnis aus einer Vielzahl von untersuchten Kombinationen verschiedener Teilscores dar.

Durch Hinzunahme der statischen Disposition konnte die Spezifität des Verfahrens für Sachsen wider Erwarten nicht erhöht werden (METZKES, 2016), sodass für alle weiteren Untersuchungen lediglich der Verfahrensteil „variable Disposition“ eine Rolle spielt.<sup>1</sup> Diese Entscheidung folgt damit dem Prinzip der Parsimonie (siehe Abschnitt 2.2.4).

<sup>1</sup>Eine gewissermaßen statische, raumbezogene Information erhält das Verfahren durch die klimatologische Ableitung der Niederschlags-schwellenwerte und SPI-Parameter für das Scoring (siehe Abschnitt 11.3.3).

Im Gegensatz zu DaHM und DeHM verwendet ScoHM weder direkt (als Inputparameter), noch indirekt (via Datenassimilation) beobachtete Durchflussdaten. Außerdem benötigt das Modell lediglich *einen* effektiven Parameter, die Rückgangskonstante des Einzellinearspeichers, welcher manuell für die kleinen Einzugsgebiete Sachsens zu  $K = 8$  h kalibriert wurde. Aus diesem Grund könnte der ScoHM-Ansatz eine robuste Methodik im Hinblick auf die Anwendung für unbeobachtete Einzugsgebiete darstellen.

### 8.1.4 Methodik zur Ermittlung von Vorhersagegüten

In diesem Abschnitt soll kurz die Methodik zur Ermittlung von Vorhersagegüten erörtert werden. Ziel dabei ist, eine fundierte quantitative Basis für eine vergleichende Bewertung der untersuchten Modellansätze zu schaffen. Es kommen dabei bereits hierin ausführlich dargestellte Antriebsdaten und Gütemaße zur Anwendung.

#### Einbezogene Antriebsdaten für Kalibrierung/Training sowie Validierung/Verifikation

Es wurden hierin bereits hinlänglich beschriebene QPEs und QPFs für den Antrieb der Modelle verwendet (siehe Abschnitte 2.1 und 6.2); auf QPE-Seite räumlich interpolierte (IDW) Ombrometerdaten sowie Stundensummen aus dem RADOLAN-RW-Produkt. Als QPFs wurden COSMO-DE sowie die DWD-Quantilvorhersage einbezogen. Der prognostische Antrieb mit nicht zur Kalibrierung/Training herangezogenen Ombrometerdaten wird auch als „Best-Forecast-Szenario“ bezeichnet.

Für Kalibrierung (DeHM) bzw. Training (DaHM) sowie die Modellvalidierung/Verifikation wurden Hochwasserereignisse der Periode 2008 bis 2015 ausgewählt. Für DeHM wurden für jedes Pegel-einzugsgebiet insgesamt jeweils ca. 20 Einzelereignisse selektiert und ca. 60 % davon den Kalibrierdaten, ca. 40 % dem Validierungsdatensatz zugeschlagen. Für DaHM wurde die gleiche Aufteilung der Daten für Netztraining und Modellvalidierung vorgenommen. Da das Netztraining anhand von Testdaten überwacht wird, wurden exakt 83 % der Trainingsdaten für das eigentliche Training und die restlichen 17 % als Testdaten bereitgestellt. ScoHM benötigt keine dedizierten Kalibrierdaten; die Modellvalidierung/Verifikation erfolgte anhand derselben Validierungsereignisse wie bei DeHM und DaHM. Details zu Antriebsdaten, Kalibrierung/Training sowie Va-

**Tabelle 8.1.5:** ScoHM, ein Bewertungsverfahren der Hochwasseranfälligkeit nach (METZKES, 2016).

	Beschreibung	Klassenobergrenzen	Spannweite der Teilscores
Grunddisposition	Mittlere Hangneigung im Einzugsgebiet	0,02/0,08/0,14/0,20/1	0 bis 4
	Formfaktor Einzugsgebiet <sup>§</sup>	0,20/0,40/0,60/0,80/1	0 bis 4
	Versiegelungsgrad	0,05/0,20/0,35/0,50/1	0 bis 4
	Anteil schneller Abflusskomponenten*	0,10/0,23/0,37/0,50/1	0 bis 4
Variable Disposition	SPI über 30 d <sup>#</sup>	-3/-2/-1/0/1/2/∞	-3 bis 3
Variable Disposition	Niederschlagssumme über 7 d	Teilscore-	0 bis 4
	Niederschlagssumme über 12/24/48 h <sup>~</sup>	Perzentile <sup>§</sup> bzw.	0 bis 4
	Ausfluss eines Einzellinearspeichers <sup>+</sup>	KOSTRA-Daten	0 bis 4
Gesamtscore (Summe Teilscores)			-3 bis 31

<sup>§</sup>Einzugsgebiet kreisförmiger für Werte gegen 1; \* nach PESCHKE ET AL. (1999); <sup>#</sup>SPI ganzzahlig gerundet; <sup>~</sup>nur der jeweils höchste Wert wird berücksichtigt; <sup>+</sup>Einzellinearspeicher mit stündlichen Niederschlägen beaufschlagt; K = 8 h; <sup>§</sup>auf Grundlage von aktuellen Daten im Zeitraum 01/2010 bis 09/2015 gezogene empirische Perzentile (75/90/95/99/100) bzw. in einer Modifikation des Verfahrens für die 12/24/48 h-Summen KOSTRA-Niederschläge der entsprechenden Andauern für Jährlichkeiten (Obergrenzen) von 0,5/1/2/5/∞.

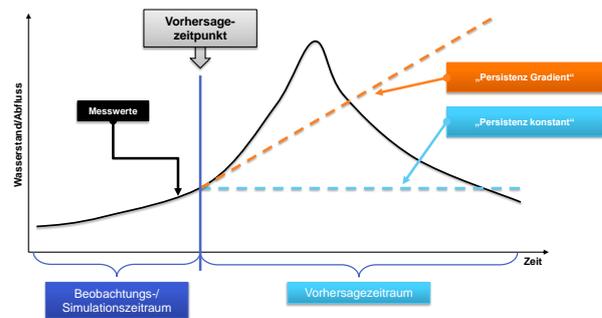
lidierung/Verifikation der Modelle finden sich in SCHÜTZE ET AL. (2017).

**Gütemaße zur quantitativen Bewertung von Vorhersagen**

Es werden die bereits ausführlich in Abschnitt 2.4 vorgestellten quantitativen Gütemaße verwendet. Zu nennen sind die deterministischen Maße KGE und der Quotient der Mittelwerte aus Beobachtungs- bzw. modellierter Zeitreihe (mBIAS) sowie die dichotomen Maße FAR, POD und daraus abgeleitet die AUC. Die deterministischen Maße dienen der Beurteilung der Ähnlichkeit von Beobachtung und Modelloutput. Die dichotomen Maße hingegen quantifizieren, wie gut anhand des Modelloutputs bestimmte schwellenwertabhängige prognostische Entscheidungen zu treffen wären. Für Details sei auf Abschnitt 2.4 verwiesen.

**Persistenzvorhersage als Referenz**

Eine Persistenzvorhersage stellt die einfachste Form einer Vorhersage dar. Dabei wird angenommen, dass sich ein aktuell bekannter Wert konstant oder – auf Basis eines Sets an Beobachtungen vorangegangener Zeitschritte – linear extrapoliert in der Zukunft fortsetzt. Die so erzielbaren Güten sind eine wichtige Referenz für die vergleichende Bewertung der mittels hydrologischer Modelle gewonnenen Vorhersagen. Die beiden Varietäten der Persistenzvorhersage sollen hierin als „Persistenz konstant“ sowie



**Abbildung 8.1.4:** Zur Illustration des Begriffs „Persistenzvorhersage“.

„Persistenz Gradient“ bezeichnet werden (siehe dazu auch Abbildung 8.1.4).

**Notwendigkeit und Anwendung des Quantilmappings auf ScoHM-Ergebnisse**

Das Scoring-Modell ScoHM liefert diskreten (ganzzahligen), un stetigen Output ohne direkten Bezug zu einer physikalischen Größe. Daraus ergeben sich zwei Konsequenzen: Erstens muss – um überhaupt eine Vergleichbarkeit herzustellen – der ScoHM-Output in die Domäne einer physikalisch sinnvollen Größe (wie beispielsweise den Durchfluss) transformiert werden. Zweitens ist zu vermuten, dass aufgrund der im ScoHM-Output enthaltenen Unstetigkeiten eine deterministische, ganglinienorientierte Bewertung eher schlechte Güten hervorbringen wird. Die Datentransformation als Zuordnung von spezifischen Scores zu konkreten Durchflusswerten wird auf Basis ei-

**Tabelle 8.1.6:** Zuordnung von Hochwasserjährlichkeiten zum Gesamtscore nach METZKES (2016).

Gesamtscore (variable Disposition)	Ungefähre Hochwasserjährlichkeit
< 10	< HQ(2)
< 12	HQ(2)
< 14	HQ(10)
< 15	HQ(20)
= 15	HQ(50)

nes Quantilmappings nach PIANI ET AL. (2009) und PIANI ET AL. (2010) vorgenommen. Details dazu finden sich in METZKES (2016).

Der Systematik von Abbildung 2.2.2 folgend, wird somit also ein direkter Vergleich von Ganglinien (modelliert vs. beobachtet – „Direct Flow Comparison“) geführt, obwohl das Modellverfahren dem Wesen nach ein Bewertungsverfahren (FSAP) ist. METZKES (2016) zeigte, dass die für das Quantilmapping benötigten Verteilungsparameter recht stabil für die untersuchten sächsischen Pegelbezugsgebiete sind, was letztendlich zu einer gut korrelierten und stetigen Beziehung zwischen Gesamtscore-Werten und Hochwasserjährlichkeiten führt. Das wiederum rechtfertigt in letzter Instanz eine zellweise Anwendung des Scoring-Verfahrens und Auswertung der Ergebnisse, beispielsweise in einer Art, wie in Tab. 2.7.1 dargestellt. Allerdings – das sei an dieser Stelle noch einmal hervorgehoben – gibt es beim Scoring keinen streng physikalisch fundierten Bezug zwischen Scores/Gesamtscore sowie der Hochwasserjährlichkeit. Die Tabelle 8.1.6 soll daher nur zur diesbezüglichen Orientierung dienen.

## 8.2 Ergebnisse der Vergleichsstudie

Mittels der erstellten Modelle werden für die in Abschnitt 8.1.4 erwähnten Antriebsdaten direkt (DeHM, DaHM) oder indirekt via Quantilmapping (ScoHM) für die Validierungsereignisse Ganglinien erzeugt, welche als Grundlage der weiteren Bestimmung der Modellgüte dienen. Beispielhaft zeigt Abbildung 8.2.1 die Modellergebnisse für den Pegel Porschdorf 1/Lachsbach gegenüber den Pegelmesswerten als Referenz. Diese Ganglinien werden im Folgenden stetig/deterministisch validiert oder aber kategoriell/dichotom verifiziert, um die Bewertung der Modellgüte hinsichtlich der Anwendungsfälle „Ganglinienvorhersage“ (siehe Abschnitt

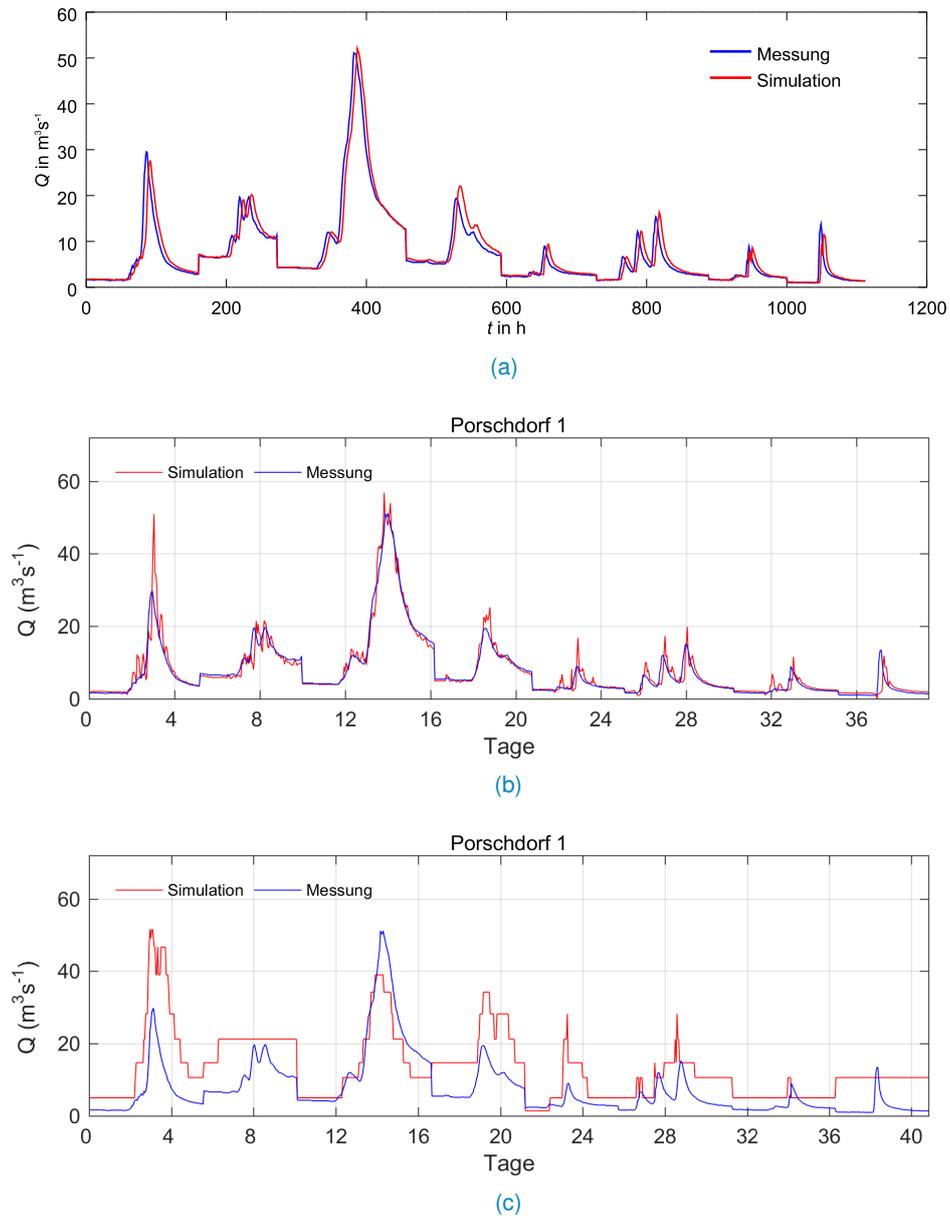
8.2.1) sowie „Hochwasserfrühwarnung“ (siehe Abschnitt 8.2.2) vorzunehmen.

### 8.2.1 Anwendungsfall Ganglinienvorhersage – Modellvalidierung

Die Bewertung der Modellgüte mit Blick auf den Anwendungsfall Ganglinienvorhersage erfolgt im Sinne einer Modellvalidierung. Das heißt, dass die zu untersuchenden Modelle für Daten/Zeiträume betrieben werden, welche nicht in der Kalibrierung/Training zugrunde gelegt wurden (siehe Abschnitt 8.1.4). Das gilt nicht für das Modell ScoHM, da dort keine Kalibrierung im eigentlichen Sinne erfolgen muss (siehe Abschnitt 8.1.3). Die Datenzeiträume/Ereignisse für die Validierung waren für die Untersuchungen zu allen drei Modellansätzen dieselben.

Wie in Abschnitt 8.1.4 beschrieben, wurden die Quotienten der Mittelwerte (mBIAS) von Modelloutput und Beobachtung sowie die KGE als deterministische Maße zur Bewertung der Modellgüte herangezogen. Die Auswertungen erfolgten pegelbezogen für verschiedene QPE/QPF-Antriebe sowie Vorhersageweiten. Als Beispiel seien hier in Abbildung 8.2.2 die Ergebnisse für mBIAS und KGE für den Pegel Porschdorf 1/Lachsbach gezeigt. Die Ergebnisse sind recht prototypisch für die Gesamtheit aller Untersuchungsgebiete; es zeigte sich zunächst, dass DeHM und DaHM mit Blick auf den Anwendungsfall Ganglinienvorhersage gut abschneiden, wohingegen ScoHM in dieser Hinsicht keinen deutlichen prädiktiven Nutzen zu liefern vermag (KGE mit geringen Werten kleiner 0,5 sowie deutlicher Bias in Anbetracht eines mBIAS signifikant größer eins). Typischerweise lässt sich für DeHM und DaHM ein Rückgang der Vorhersagegüte mit zunehmender Vorhersageweite feststellen, während hierzu bei den ScoHM-Ergebnissen offenbar kein Zusammenhang besteht. Die Konstellation aus unterschiedlichen QPEs/QPFs sowie unterschiedlichen Update-Zyklen scheint ebenfalls keinen signifikanten Einfluss auf die Modellgüte bei der Ganglinienvorhersage zu haben, mit Ausnahme des Antriebs durch die Quantilvorhersage, welche (erwartbar aufgrund ihrer generellen raum-zeitlichen Auflösung) stets ein wenig schlechter performte.

Die Gütemaße wurden für alle in die Untersuchung einbezogenen Pegelbezugsgebiete ermittelt. Somit lässt sich auch über alle Pegelbezugsgebiete eine auf die Ergebnishäufigkeiten der Maße mBIAS und KGE bezogene Auswertung vornehmen (siehe Abbildung 8.2.3). In den

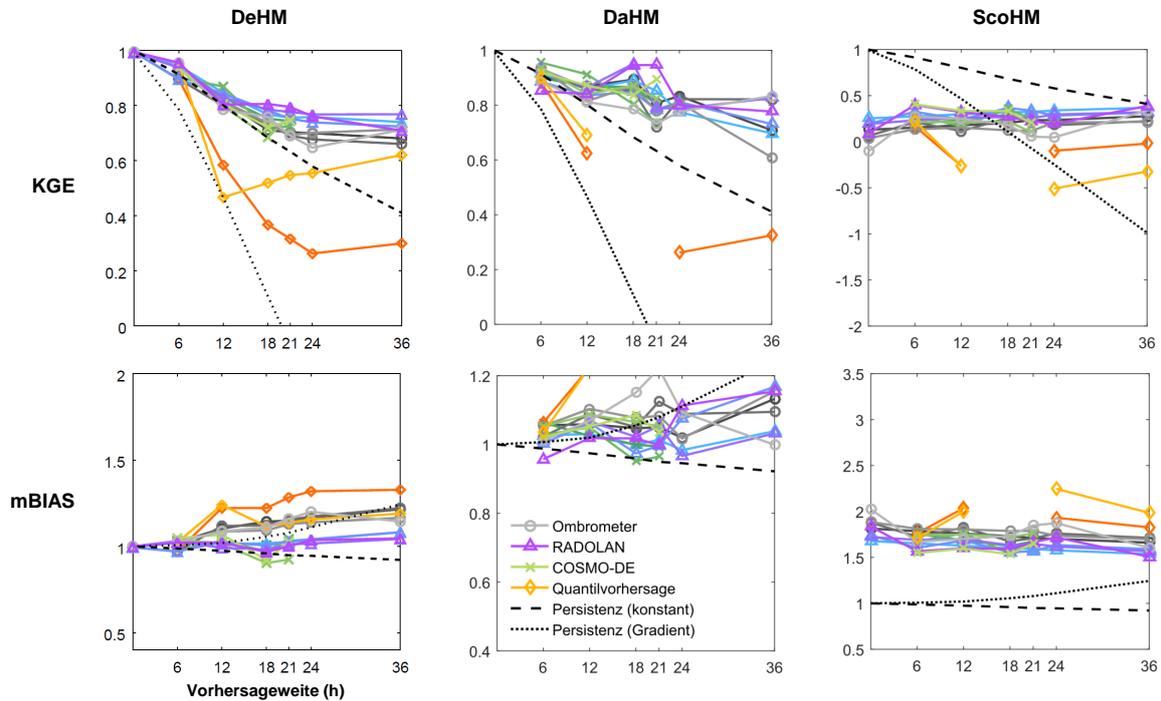


**Abbildung 8.2.1:** Modelloutputs von (a) DeHM, (b) DaHM sowie (c) ScoHM für den Pegel Porschdorf 1/Lachsbach, Vorhersageweite 6 h. Ganglinien aus einzelnen Validierungsereignissen zusammengesetzt; Kalibrier-/Trainingsergebnisse sind nicht dargestellt. Abbildungen entnommen aus SCHÜTZE ET AL. (2017).

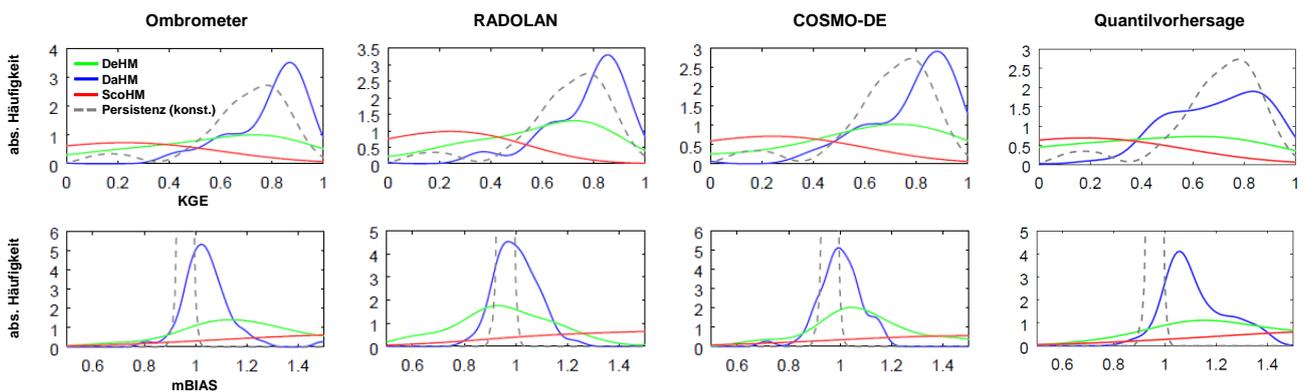
Häufigkeitsverteilungen der Güten zeigt sich für DaHM ein deutlich monomodales Verhalten mit der größten statistischen Masse bei hohen KGE-Werten (jenseits 0,8) sowie Werten der Mittelwertquotienten um eins; damit weist hier – also über alle untersuchten Pegelzugsgebiete – DaHM die besten Güten aus. DeHM zeigt ebenfalls ein monomodales Verhalten, wenn auch bei weitem nicht so ausgeprägt; die Erwartung der Güten für KGE und mBIAS ist hier weniger günstig als bei DaHM. Interessanterweise schneidet für Vorhersageweiten bis 12 Stunden die Persistenz-

vorhersage (Fall „konstant“) statistisch gesehen besser ab, als DeHM. Für größere Vorhersageweiten gewinnt allerdings DeHM gegenüber der Persistenzvorhersage. ScoHM hingegen zeigt für den Anwendungsfall Ganglinienvorhersage kaum einen signifikanten prädiktiven Nutzen, was sich in geringen KGE-Werten und einem deutlichen Bias (mBIAS-Werte ungleich 1) zeigt.

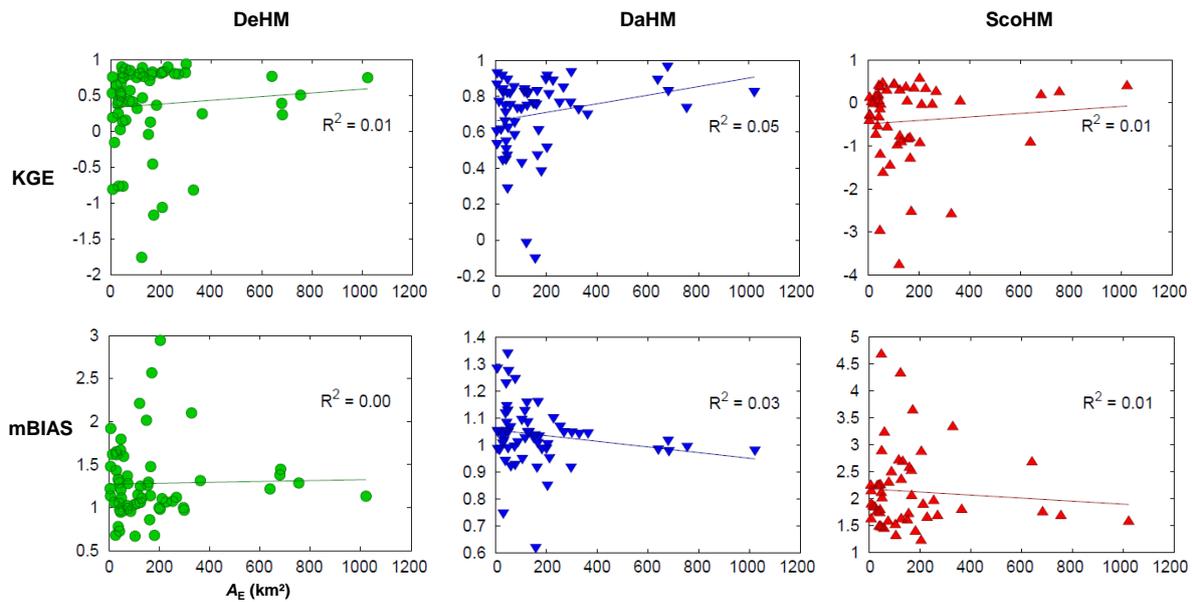
Untersucht man den statistischen Zusammenhang zwischen den ermittelten Gütemaßen und der Einzugsgebietsgröße, so ist festzustellen, dass die Güten am stärksten



**Abbildung 8.2.2:** Vergleich der Gütemaße Quotient der Mittelwerte (mBIAS) und Kling-Gupta-Effizienz (KGE) für die Modellvalidierung (Anwendungsfall Ganglinienvorhersage) der Modelle DeHM, DaHM und ScoHM über verschiedene Update-Zyklen für vier QPEs/QPFs, beispielhaft für den Pegel Porschdorf 1/Lachsbach. Je heller die Linie einer Farbe, desto länger ist der Update-Zyklus. Im Vergleich dazu dargestellt sind die Ergebnisse der zwei Varianten der Persistenzvorhersage. Abbildung verändert nach SCHÜTZE ET AL. (2017).



**Abbildung 8.2.3:** Häufigkeitsbasierte Auswertung der Gütemaße Quotient der Mittelwerte (mBIAS) und Kling-Gupta-Effizienz (KGE) über alle Pegelzugsgebiete für die Modellvalidierung (Anwendungsfall Ganglinienvorhersage) der Modelle DeHM, DaHM und ScoHM für verschiedene Antriebe, exemplarisch für eine Vorhersageweite von 12 Stunden, Update-Zyklus 12 Stunden. Häufigkeiten mit Kerndichteschätzung ermittelt; zum Vergleich dargestellt sind die Ergebnisse einer Variante der Persistenzvorhersage. Abbildung verändert nach SCHÜTZE ET AL. (2017).



**Abbildung 8.2.4:** Gütemaße Quotient der Mittelwerte (mBIAS) und Kling-Gupta-Effizienz (KGE) als Funktion der Einzugsgebietsgröße  $A_E$  über alle Pegel Einzugsgebiete für die Modellvalidierung (Anwendungsfall Ganglinienvorhersage) der Modelle DeHM, DaHM und ScoHM, exemplarisch für den Antrieb mit Ombrometerdaten und eine Vorhersageweite von 12 Stunden, Update-Zyklus 12 Stunden. Abbildung verändert nach SCHÜTZE ET AL. (2017).

bei geringen Einzugsgebietsgrößen streuen. Weiterhin findet man – ebenfalls erwartungsgemäß – einen deutlichen Rückgang der Streuung der Güten mit zunehmender Einzugsgebietsgröße (größere Werte der KGE sowie Annäherung der mBIAS-Werte an eins; siehe Abbildung 8.2.4). Der Zusammenhang zwischen Güten und Einzugsgebietsgröße ist sicherlich maßgeblich auf die Verbesserung der Niederschlagschätzung mit zunehmender Bilanzflächen-größe zurückzuführen (vergleiche Kapitel 6 und 7); im Übrigen besteht keine Korrelation zwischen der AUC und  $A_E$ . Die Ergebnisse für Modellantriebe mit QPF-Daten sind dazu konsistent, mit entsprechend (leicht) geringeren Güten (hierin nicht dargestellt; siehe dazu SCHÜTZE ET AL., 2017).

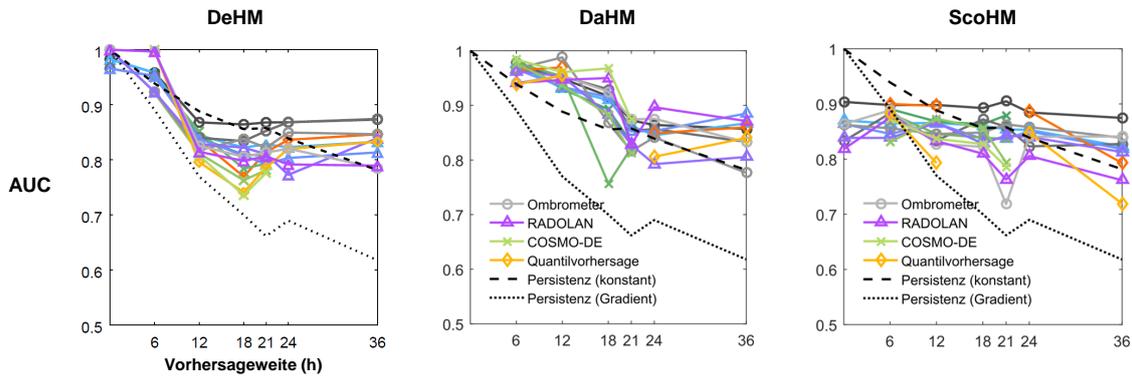
### 8.2.2 Anwendungsfall Hochwasserfrühwarnung – Verifikation von Modellergebnissen

Die Bewertung der Eignung der untersuchten Modellansätze für den Anwendungsfall Hochwasserfrühwarnung erfolgt anhand der bereits für den Anwendungsfall Ganglinienvorhersage (Abschnitt 8.2.1) untersuchten Ereignisse/Zeitreiche; Daten, welche für Kalibrierung/Training herangezogen wurden, bleiben bei der Untersuchung au-

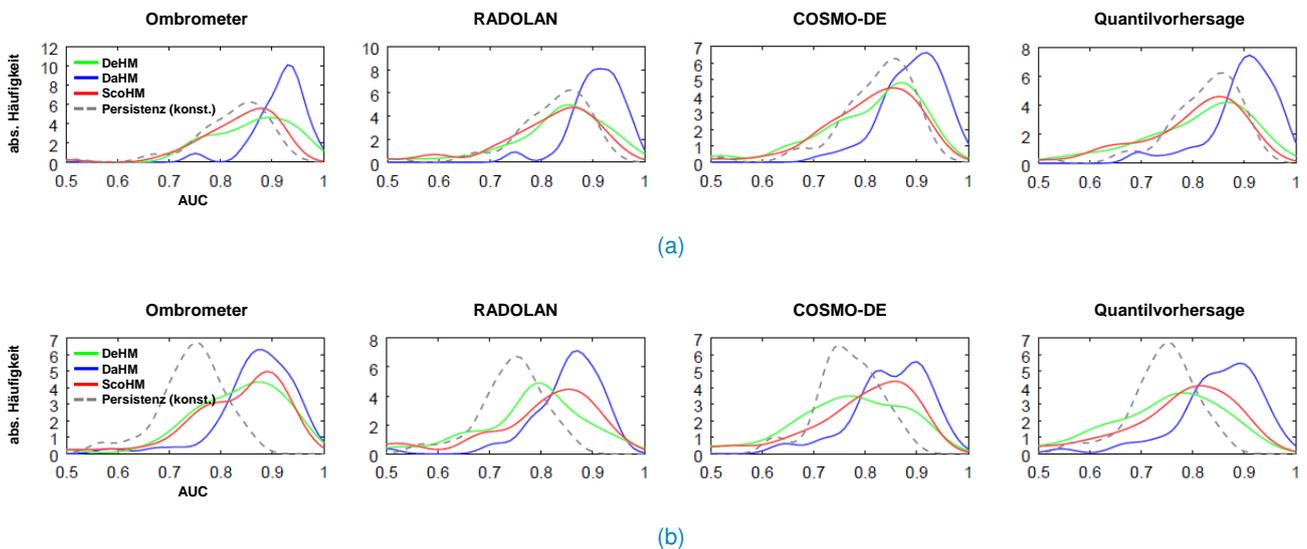
ßen vor. Die Gütebestimmung erfolgt anhand des dichotomen Maßes der AUC und basiert auf einer schwellenwertbezogenen Auswertung der Modelloutputs (siehe Abschnitt 8.1.4). Die AUC wurde – wie bereits für den Anwendungsfall Ganglinienvorhersage – für unterschiedliche QPE/QPF-Antriebe, verschiedene Vorhersageweiten sowie variable Update-Zyklen bestimmt. Damit sind Ergebnisdarstellungen wie in Abbildung 8.2.5 zu erhalten.

Abbildung 8.2.5 zeigt Ergebnisse für den Pegel Porsdorf 1/Lachsbach, welche auch hier wieder im Vergleich mit den weiteren Ergebnissen für andere Pegel als prototypisch angesehen werden können. Wie auch bei den Gütemaßen zu Beurteilung des Anwendungsfalls Ganglinienvorhersage, ist für DeHM und DaHM ein Rückgang der AUC mit zunehmender Vorhersageweite zu sehen, was nicht für ScoHM gilt. Weiterhin hat erneut die Konstellation aus unterschiedlichen QPEs/QPFs sowie unterschiedlichen Update-Zyklen keinen wesentlichen Einfluss auf die Ausprägung der AUC, was auch für die Quantilvorhersage-QPF gilt.

Abbildung 8.2.6 zeigt die häufigkeitsbasierte Auswertung der ermittelten AUC-Werte über alle Pegel Einzugsgebiete, exemplarisch für Vorhersageweiten von 12 sowie 24 Stunden. Es zeigt sich – wie bereits beim Anwendungsfall Ganglinienvorhersage – dass DaHM die besten Güten



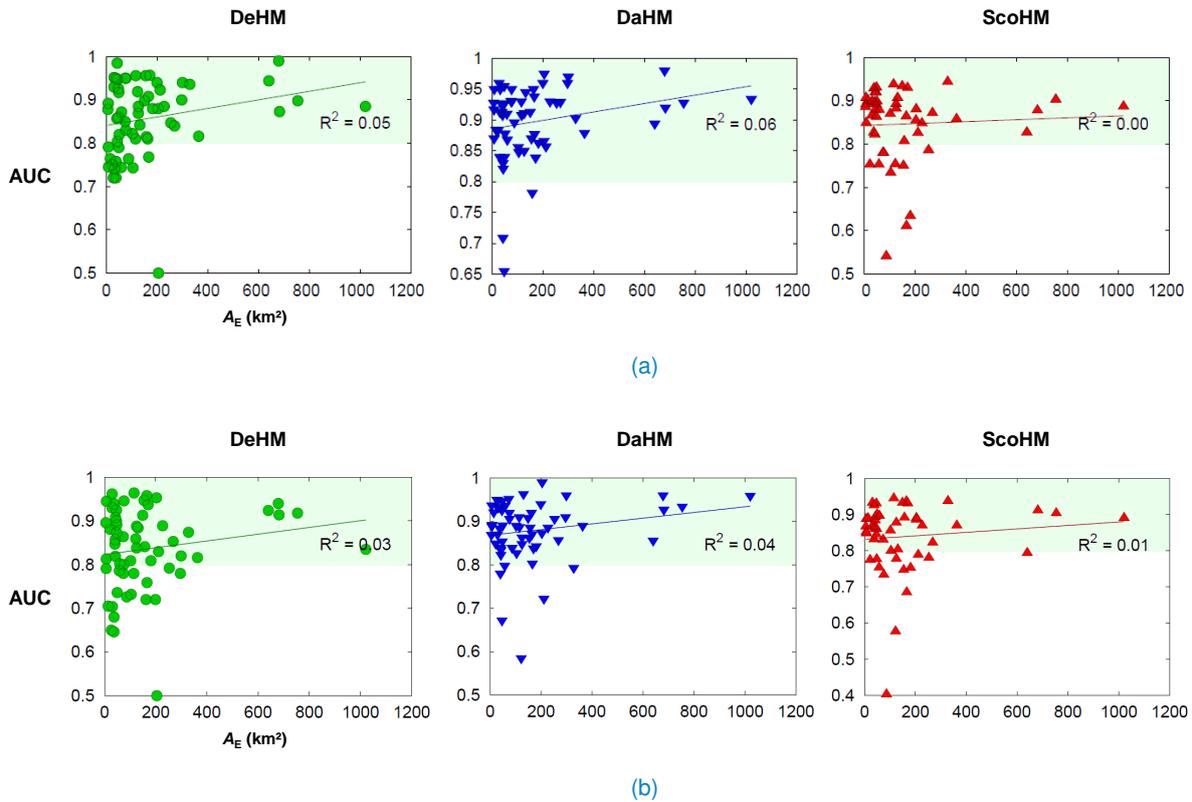
**Abbildung 8.2.5:** Vergleich des Gütemaßes Area Under (ROC) Curve (AUC) für die Modellverifikation (Anwendungsfall Hochwasserfrühwarnung) der Modelle DeHM, DaHM und ScoHM über verschiedene Update-Zyklen für vier QPEs/QPFs, beispielhaft für den Pegel Porschdorf 1/Lachsbach. Je heller die Linie einer Farbe, desto länger ist der Update-Zyklus. Im Vergleich dazu dargestellt sind die Ergebnisse der zwei Varianten der Persistenzvorhersage. Abbildung verändert nach SCHÜTZE ET AL. (2017).



**Abbildung 8.2.6:** Häufigkeitsbasierte Auswertung des Gütemaßes Area Under (ROC) Curve (AUC) über alle Pegelzugsgebiete für die Modellverifikation (Anwendungsfall Hochwasserfrühwarnung) der Modelle DeHM, DaHM und ScoHM für verschiedene Antriebe, exemplarisch für eine Vorhersageweite von (a) 12 Stunden sowie (b) 24 Stunden (21 Stunden bei COSMO-DE), Update-Zyklus 12 Stunden. Häufigkeiten mit Kerndichteschätzung ermittelt; zum Vergleich dargestellt sind die Ergebnisse einer Variante der Persistenzvorhersage. Abbildung verändert nach SCHÜTZE ET AL. (2017).

aufweist. Allerdings gilt diese Aussage vor allem für kurze Vorhersageweiten in der Größenordnung von wenigen Stunden. Für längere Vorhersageweiten gleichen sich die Güten der untersuchten Modellansätze stark an, wobei beispielsweise für eine Vorhersageweite von 24 Stunden ScoHM gar besser abschneidet, als DeHM und die Unterschiede zu DaHM entsprechend gering ausfallen. Interessant ist weiterhin, dass für kurze Vorhersageweiten lediglich DaHM einen signifikanten prädiktiven Mehrwert gegenüber der Persistenzvorhersage bietet.

Abbildung 8.2.7 zeigt den Zusammenhang der AUC von der Größe der untersuchten Einzugsgebiete, jeweils für Vorhersageweiten von 12 sowie 21 Stunden. Auch für die AUC ist – wie bereits bei den deterministischen Maßen mBI-AS und KGE – die Streuung für kleinere Einzugsgebietsgrößen größer, was wiederum hauptsächlich auf erratische Effekte der Niederschlagsschätzung für kleine Bilanzgebiete zurückzuführen sein dürfte. Im Übrigen besteht keine Korrelation zwischen der AUC und  $A_E$ . In Abbildung 8.2.7 weiterhin dargestellt sind Bereiche mit AUC-Werten größer 0,8, wobei von mindestens einem guten prädiktiven Nutzen



**Abbildung 8.2.7:** Gütemaß Area Under (ROC) Curve (AUC) als Funktion der Einzugsgebietsgröße  $A_E$  über alle Pegelinzugsgebiete für die Modellverifikation (Anwendungsfall Hochwasserfrühwarnung) der Modelle DeHM, DaHM und ScoHM, exemplarisch für den Antrieb mit Ombrometerdaten und eine Vorhersageweite von (a) 12 Stunden sowie (b) 21 Stunden, Update-Zyklus 12 Stunden. Grün markiert sind die Bereiche mit AUC-Werten größer 0,8. Abbildung verändert nach SCHÜTZE ET AL. (2017).

auszugehen ist. Es wird ersichtlich, dass für kleine Einzugsgebiete ( $A_E < 200 \text{ km}^2$ ) überwiegend ein mindestens guter prädiktiver Nutzen zu erzielen sein wird, die Güten für einige Gebiete aber dahinter zurückbleiben,<sup>1</sup> was der Unsicherheit bei der Niederschlagsschätzung zuzuschreiben ist. Die hier nicht dargestellten Ergebnisse für Antriebe mit QPF-Daten sind zu den erörterten Befunden wiederum konsistent, mit entsprechend (leicht) geringeren Güten (siehe SCHÜTZE ET AL., 2017).

**Schlussfolgerung 30:** Für die Ganglinienvorhersage sind Bewertungsansätze der Hochwasserneigung (Scoring-Verfahren) ungeeignet; für den Anwendungsfall Hochwasserfrühwarnung sind sie jedoch für mittlere Vorhersageweiten (ab 12 Stunden) datengetriebenen und deterministischen Verfahren annähernd ebenbürtig. ❖

<sup>1</sup>Allerdings ist auch für Werte  $AUC > 0,5$  noch davon auszugehen, dass ein prädiktiver Nutzen vorhanden ist.

### 8.3 Zur Bewertung der regionalen Gültigkeit/Übertragbarkeit der untersuchten hydrologischen Modellansätze

Bei der modellgestützten Hochwasserfrühwarnung für kleine Einzugsgebiete ist es immanent wichtig, die räumliche Übertragbarkeit von Modellansätzen zu bewerten, also zu bestimmen, „ob und mit welchen Einschränkungen Modelle zur Durchflussvorhersage regionalisierbar sind“ SCHÜTZE ET AL. (2017). Das ist natürlich vor allem dann von Interesse, wenn die Einzugsgebiete unbeepegelt sind, was für kleine Einzugsgebiete die Regel sein wird. SCHÜTZE ET AL. (2017) erwähnen weiterhin, dass „nicht zuletzt mittels der Bestimmung der räumlichen Übertragbarkeit der Modelle [ihre] regionale Robustheit eingeschätzt werden [kann]“.

Methodisch kommt dazu ein regionales Jackknifing zum Einsatz, also eine Methode des statistischen Resamplings. Dabei wird aus einer Stichprobe mit  $n$  Elementen

ten jeweils ein Element entnommen und es werden somit  $n$  neue, reduzierte Stichproben erhalten. Das Verfahren wurde ausschließlich in Flussgebieten mit mehreren vorhandenen Pegeln durchgeführt (siehe Tabellen 8.1.2 bis 8.1.3). Gewissermaßen wird mittels des Jackknifings jeder dieser Pegel einmal entnommen und die Lücke durch Informationen der anderen Pegel im Flussgebiet ersetzt. Da wie bereits erwähnt Flussgebiete mit einzelnen Pegeln nicht betrachtet werden, wurden von den untersuchten 50 Pegeln 35 jeweils einmal entnommen. Die in der ersten Stufe der Studie untersuchten Flussgebiete (siehe Tabelle 8.1.1) wurden bei der Regionalisierungsstudie nicht mit betrachtet.

### 8.3.1 Regionalisierung für DaHM

In das neuronale DaHM-Modell gehen auch Durchflussdaten ein (siehe Gleichung 8.1.1). Weiterhin hat der Durchfluss als Zielgröße entscheidenden Einfluss auf das Netztraining (SCHÜTZE ET AL., 2017). Daher werden für einen betrachteten (und beim Jackknifing zu entnehmenden Pegel) dessen nunmehr unbekanntes Durchflüsse aus denen eines Referenzpegels abgeschätzt, wobei der nächste ober- oder unterstromig liegende Pegel gewählt wurde, abhängig von der geringsten Differenz von  $A_E$  bezüglich des Untersuchungspegels. In einigen, hydrologisch begründeten Fällen, erfolgte eine andere Wahl. Beispielsweise wurde im Fall Herzogswalde 1 der Einfluss des Rothschnöberger Stollens auf den Referenzpegel Munzig berücksichtigt; der Pegel Neidhardtsthal entfällt aufgrund des Einflusses der Talsperre Eibenstock. Tabelle 8.3.1 listet die bei der Regionalisierung von DaHM (und ScoHM; siehe ff.) betrachteten Pegel und Referenzpegel.

Für den betrachteten Pegel wird eine synthetische Durchflussganglinie  $Q^{\text{Reg}}$  erstellt. Dabei wird sich auf den Durchfluss  $Q^{\text{Ref}}$  am Referenzpegel bezogen, wobei die Verhältnisse der Einzugsgebietsflächen  $A_E^{\text{Reg}}$  und  $A_E^{\text{Ref}}$  sowie der Niederschlagssummen der vergangenen fünf Tage  $P_{5d}^{\text{Reg}}$  und  $P_{5d}^{\text{Ref}}$  wie folgt einbezogen werden:

$$Q_{\pm t}^{\text{Reg}} = Q^{\text{Ref}} \frac{A_E^{\text{Reg}}}{A_E^{\text{Ref}}} \frac{P_{5d}^{\text{Reg}}}{P_{5d}^{\text{Ref}}} \quad (8.3.1)$$

Es wird die Wellenlaufzeit  $\pm t$  zwischen den beiden Pegeln berücksichtigt, wobei Abschätzungen nach ERLER ET AL. (2011) und WAGNER (2012) zur Anwendung kamen.

### 8.3.2 Regionalisierung für DeHM

Aufgrund seiner Modellstruktur kann DeHM an allen topologischen Knoten („Teilgebiete“) Outputs liefern. Bei Entnahme eines Pegels im Sinne des Jackknifings heißt das, dass an diesem Knoten keine Vergleichsdaten vorhanden sind. Hier muss wiederum eine Zuordnung des betrachteten Teilgebiets zu einem beobachteten Querschnitt, in der Regel dem nächsten unterstrom gelegenen Pegel, vorgenommen werden. Die Kalibrierung und Validierung/Verifikation erfolgt ohne die Kenntnis der Daten des entnommenen Pegels. Eine Ausnahme bilden die Auslasspegel der Flussgebiete; diese Gebiete werden jeweils dem nächsten oberstromigen Pegel zugeordnet. Da DeHM ein deterministisches hydrologisches Modell ist, werden an allen Topologieknoten Anfangsbedingungen benötigt; diese müssen für jeweils die entnommenen Pegel geschätzt werden (wiederum aus den Werten des nächsten ober- oder unterstromigen Pegels). Im Zwischeneinzugsgebiet des letzten unterstromigen Pegels eines Flussgebietes gibt es zumeist Teilflächen, welche unbepegelt sind (beispielsweise Kopfgebiete im Nebenschluss). Für diese Teilgebiete wird die Anfangsbedingung anhand einer Simulation der Ganglinie am untersten Pegel abgeschätzt, was via einer Übertragung von Abflussspenden erfolgt. Die dafür verwendete allgemeine Form findet sich bei SCHWARZE ET AL. (2015):

$$q_{\text{norm}} = Q \frac{10^3}{A_E} \left( \frac{A_E}{\alpha} \right)^\beta \quad (8.3.2)$$

mit der normierten Spende  $q_{\text{norm}}$  [ $L^3L^{-2}T$ ], dem Durchfluss  $Q$  [ $L^3T^{-1}$ ], der Einzugsgebietsfläche  $A_E$  [ $L^2$ ], der Normierungsfläche  $\alpha$  [ $L^2$ ] sowie dem freien Koeffizienten  $\beta$  [–], wobei für Sachsen  $\beta = 0,12$  gilt (SCHWARZE ET AL., 2015; SCHÜTZE ET AL., 2017).<sup>1</sup> Durch gleichsetzen von  $q_{\text{norm}}$  an zwei Pegeln (Zielpegel und Referenz) und umstellen nach  $Q$  erhält man für den Zielpegel:

$$Q^{\text{Reg}} = Q^{\text{Ref}} \frac{A_E^{\text{Reg}}}{A_E^{\text{Ref}}} \left( \frac{A_E^{\text{Ref}}}{A_E^{\text{Reg}}} \right)^\beta \quad (8.3.3)$$

Naturgemäß ist die Gleichsetzung der Spenden nur begrenzt belastbar; besonders bei Hochwasserereignissen werden damit am Zielpegel tendenziell die Scheitel zu hoch und die fallenden Äste der Ganglinien zu niedrig geschätzt. Laut SCHÜTZE ET AL. (2017) funktioniert die Abschätzung

<sup>1</sup>Spende hier in  $l \cdot s^{-1} \text{ km}^{-2}$ , Durchfluss in  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  und Flächen in  $\text{km}^2$ .

**Tabelle 8.3.1:** Übersicht der für die Regionalisierung gewählten Referenzpegel für DaHM und ScoHM. Der Pegel Neidhardtsthal entfällt wegen des Einflusses der Talsperre Eibenstock. Tabelle entnommen aus SCHÜTZE ET AL. (2017).

Zielpegel	Referenzpegel	Zielpegel	Referenzpegel
Rothenthal	Borstendorf	Herzogswalde 1	Munzig 1
Zöblitz	Borstendorf	Munzig 1	Garsebach
Borstendorf	Zöblitz	Garsebach	Munzig 1
Pietzschwitz	Prischwitz	Bad Elster 1	Adorf 1
Prischwitz	Zescha	Adorf 1	Oelsnitz
Zescha	Prischwitz	Oelsnitz	Adorf 1
Neustadt 1	Sebnitz 2	Sachsengrund	Schönheide 3
Sebnitz 2	Neustadt 1	Schönheide 3	Aue 3
Porsdorf 1	Sebnitz 2	Eibenstock 2	Schönheide 3
Großschweidnitz	Gröditz 2	Markersbach 1	Markersbach 2
Gröditz 2	Großschweidnitz	Markersbach 2	Markersbach 1
Bärenfels	Schmiedeberg 1	Wildenau 1	Aue 1
Schmiedeberg 1	Dippoldiswalde 1	Aue 1	Wildenau 1
Dippoldiswalde 1	Schmiedeberg 1	Aue 3	Niederschlema
Schöps	Jänkendorf 1	Niederschlema	Aue 3
Jänkendorf 1	Schöps	Wolfersgrün	Zwickau-Pölbitz
Wernersbach HP	Herzogswalde 1	Zwickau-Pölbitz	Niederschlema

**Tabelle 8.3.2:** Übersicht der für die Regionalisierung (Berechnung der Anfangsbedingungen) gewählten Referenzpegel für DeHM. Tabelle entnommen aus SCHÜTZE ET AL. (2017).

Zielpegel	Referenzpegel	Zielpegel	Referenzpegel
Rothenthal	Borstendorf	Munzig 1	Garsebach
Zöblitz	Borstendorf	Garsebach	Munzig 1
Borstendorf	Zöblitz	Bad Elster 1	Adorf 1
Pietzschwitz	Prischwitz	Adorf 1	Oelsnitz
Prischwitz	Zescha	Oelsnitz	Adorf 1
Zescha	Prischwitz	Sachsengrund	Schönheide 3
Neustadt 1	Porsdorf 1	Schönheide 3	Neidhardtsthal 1
Sebnitz 2	Porsdorf 1	Eibenstock 2	Neidhardtsthal 1
Porsdorf 1	Sebnitz 2	Neidhardtsthal 1	Aue 3
Großschweidnitz	Gröditz 2	Markersbach 1	Markersbach 2
Gröditz 2	Großschweidnitz	Markersbach 2	Wildenau 1
Bärenfels	Schmiedeberg 1	Wildenau 1	Aue 1
Schmiedeberg 1	Dippoldiswalde 1	Aue 1	Aue 3
Dippoldiswalde 1	Schmiedeberg 1	Aue 3	Niederschlema
Schöps	Jänkendorf 1	Niederschlema	Zwickau-Pölbitz
Jänkendorf 1	Schöps	Wolfersgrün	Zwickau-Pölbitz
Wernersbach HP	Herzogswalde 1	Zwickau-Pölbitz	Niederschlema
Herzogswalde 1	Munzig 1		

im Niedrig- und Mittelwasserbereich jedoch gut, was mit Blick auf den Zweck der Ermittlung des Anfangszustandes bestimmter Berechnungsknoten als hinreichend genau erscheint. Tabelle 8.3.2 listet die für die Berechnung der Anfangsbedingungen einbezogenen Referenzpegel.

### 8.3.3 Regionalisierung für ScoHM

Für ScoHM werden keine Durchflussdaten als Inputparameter des Modells benötigt. Allerdings ist es für eine Gütebewertung des Modells notwendig, die dimensionslosen Scores des Modelloutputs in Zusammenhang mit Durchflussdaten zu bringen. Hier kommt wie bereits erwähnt ein Quantilmapping zum Einsatz (vergleiche Abschnitt 8.1.4), wofür längere Durchflusszeitreihen bereitgestellt werden müssen. Hierfür werden – wie auch für DaHM – anhand von an Referenzpegeln bekannten Durchflussverläufen synthetische Ganglinien am Zielpegel abgeleitet (Pegel siehe Tabelle 8.3.1). Es wird vereinfachend angenommen, dass sich die Durchflüsse an Referenz- und Zielpegel wie deren Einzugsgebietsgrößen zueinander verhalten:

$$Q^{\text{Reg}} = Q^{\text{Ref}} \frac{A_E^{\text{Reg}}}{A_E^{\text{Ref}}} \quad (8.3.4)$$

Im Vergleich zu Gleichung 8.3.1 entfällt hier die Berücksichtigung des Niederschlagsverhältnisses. Der Grund dafür ist, dass unter Umständen das Niederschlagsverhältnis sehr groß werden kann, was wiederum zu einer Überschätzung des korrespondierenden Durchflusses führt. Da allerdings das Quantilmapping sehr sensitiv gegenüber einzelnen, extremen Werten von  $Q$  ist, würden diese zu einem fehlerhaften Mapping der Scores auf Durchflusswerte führen.

### 8.3.4 Ergebnisse der Regionalisierungsstudie

Abbildung 8.3.1 zeigt prototypische Ergebnisse der Regionalisierungsstudie für den Modellantrieb mit Ombrometerdaten (Best-Forecast-Szenario). Dargestellt sind häufigkeitsbasierte Auswertungen (Boxplots über alle Einzugsgebiete) für die beiden Gütemaße KGE (Anwendungsfall Ganglinienvorhersage) sowie AUC (Anwendungsfall Hochwasserfrühwarnung) in Abhängigkeit von der Vorhersageweite für den Referenzdatensatz sowie den regionalisierten (via Jackknifing erhaltenen) Datensatz. Weitere Ergebnisse der Regionalisierungsstudie, beispielsweise für weitere

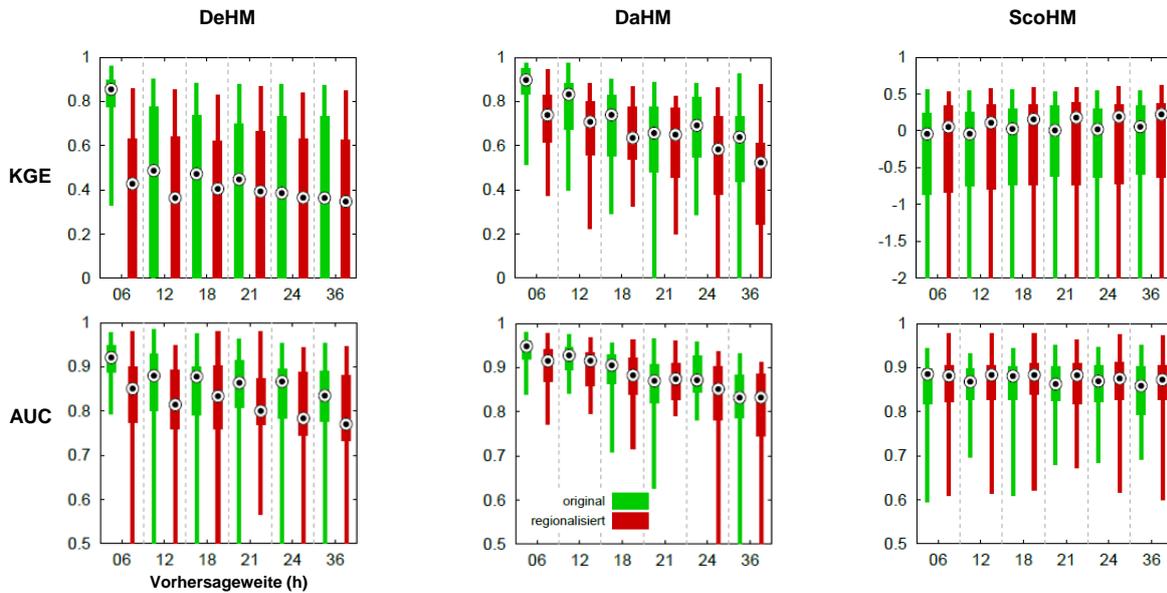
QPF-Antriebe, finden sich bei SCHÜTZE ET AL. (2017), werden aber aus Gründen der Übersichtlichkeit hierin nicht dargestellt.

Es zeigt sich, dass sich die für DeHM und DaHM bei räumlicher Übertragung zu erwartenden Ergebnismäßen verschlechtern, wobei diese Verschlechterung ausgeprägter für die KGE ist (Anwendungsfall Ganglinienvorhersage). ScoHM hingegen zeigt sich erstaunlich robust bei der regionalen Übertragung des Modellansatzes; teilweise ist sogar eine Verbesserung der Güten im regionalisierten Fall zu beobachten, was für den Anwendungsfall Hochwasserfrühwarnung den Ansatz für kleine, unbepegelte Gebiete und Vorhersageweiten von 21 Stunden und mehr überlegen erscheinen lässt! Allerdings – wie bereits herausgestellt wurde – hat ScoHM mit Blick auf die KGE (Anwendungsfall Ganglinienvorhersage) kaum einen prädiktiven Nutzen und ist in dieser Hinsicht DeHM und vor allem DaHM deutlich unterlegen.

## 8.4 Diskussion

Tabelle 8.4.1 nimmt eine Gegenüberstellung (oberer Teil der Tabelle) und vergleichende qualitative Bewertung (unterer Teil) der untersuchten hydrologischen Modellansätze DeHM, DaHM und ScoHM vor. Es wird deutlich, dass für den Anwendungsfall Frühwarnung ein sehr simpler Scoring-Ansatz vergleichsweise hohen prädiktiven Nutzen bietet und gleichzeitig robust regionalisierbar ist. Eingedenk der sehr einfachen implementierungsseitigen und operationellen Ansprüche dieses Ansatzes, ist er nach dem aktuellen Kenntnisstand zur Ableitung von qualitativen Frühwarnprodukten zunächst zu bevorzugen. Anders sieht es aus, wenn die möglichst exakte Simulation des Ganglinienverlaufs notwendig ist (Anwendungsfall Ganglinienvorhersage). Hier sind datengetriebene Verfahren (beispielsweise KNN-basiert) oder „klassische“ hydrologische Modellierung durchaus überlegen.

Es bleibt also festzuhalten, dass *per se* keiner der untersuchten Modellansätze gegenüber eines anderen favorisiert werden sollte. Aspekte wie Ansprüche und Erwartungen von Nutzern von Frühwarnprodukten (Kapitel 5) oder die Güte der antreibenden Niederschlagsschätzungen bzw. quantitativen Niederschlagsvorhersagen (Kapitel 6 und 7) müssen mit bei der Wahl eines für die Ableitung von Hochwasserfrühwarnungen geeigneten hydrologischen Modellansatzes berücksichtigt werden. Nicht zuletzt



**Abbildung 8.3.1:** Boxplots von KGE (Anwendungsfall Ganglinienvorhersage) sowie AUC (Anwendungsfall Hochwasserfrühwarnung) in Abhängigkeit von der Vorhersageweite über alle untersuchten Einzugsgebiete für den Referenzdatensatz (grün) sowie den regionalisierten (via Jackknifing erhaltenen) Datensatz (rot). Antrieb mit Ombrometerdaten (Best-Forecast-Szenario); Update-Zyklus 12 Stunden. Abbildung verändert nach SCHÜTZE ET AL. (2017).

spielen auch Faktoren wie Erstellungs-, Implementierungs- und Betriebsaufwand solcherlei Modelle für deren operationellen Einsatz eine nicht zu vernachlässigende Rolle!

Eine generelle Frage ist, ob es sinnvoll sein kann, ein Modellsystem für unterschiedliche Anwendungsfälle (konkret: Ganglinienvorhersage und Hochwasserfrühwarnung) zu konzipieren und zu betreiben (wie beispielsweise das die Hochwasservorhersagezentralen in Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz tun). Eine solche synergetische Betrachtungsweise böte eine Reihe von Vorteilen, vor allem durch die Verringerung des operationellen Aufwandes beziehungsweise die gleichsinnige Behandlung von Pre- und Postprocessing-Verfahren etc. Andererseits sind einige fachliche Aspekte nicht leicht zu behandeln; beispielsweise muss solch ein „synergetisches Modellsystem“ über alle Durchflussbereiche (Niedrigwasser bis extremes Hochwasser) eine zuverlässige Prognose ermöglichen.

**Schlussfolgerung 31:** Für den Anwendungsfall Hochwasserfrühwarnung bietet ein simples Scoring-Verfahren einen hohen prädiktiven Nutzen bei gleichzeitig guter räumlicher Übertragbarkeit bzw. Generalisierbarkeit und ist in dieser Hinsicht datengetriebenen und deterministischen Verfahren überlegen. ❖

**Tabelle 8.4.1:** Modellgegenüberstellung DeHM, DaHM und ScoHM; grün: vorteilhaft; gelb: eher nachteilig, potentiell optimierbar; orange: nachteilig. Tabelle verändert nach METZKES (2016).

	DeHM	DaHM	ScoHM
Modellklasse	Deterministisches konzeptionelles Modell	Datengetriebenes Modell (KNN)	Klassifizierendes Bewertungsverfahren (FSAP)
Mathematische Abbildung	Konzeptionell-analytische Modellbausteine (enthalten effektive Parameter)	Nichtlineare Regression (zweilagiges Perzeptron mit verdeckter Schicht)	Scoring-Verfahren (beim Quantilmapping handelt es sich um nichtlineare Regression)
Antriebsdaten (Inputparameter)	Niederschlag, Durchfluss (via Zustandsnachführung)	Niederschlag, Durchfluss	Niederschlag
Modellausgabe (Outputparameter)	Durchflussganglinie (quasi-stetig)	Durchflussganglinie (quasi-stetig)	Dimensionsloser Score (unstetig)
Implementierungsaufwand	Hoch	Mittel	Gering
Trainings-/Kalibrierungsaufwand	Hoch	Mittel	Gering
Aufwand im operationellen Einsatz	Mittel bis hoch	Gering	Gering
Zeitliche Extrapolierbarkeit	Uneingeschränkt (aber prozessabhängig limitierte Gültigkeit effektiver Parameter)	Eingeschränkt (limitierte Beobachtungsreihen für Netztraining)	Eingeschränkt (limitierte Beobachtungsreihen für Ableitung von Schwellenwerten)
Modellgüte beim Hindcasting; Anwendungsfall Ganglinienvorhersage	Gut (abnehmend mit zunehmender Vorhersageweite)	Sehr gut (abnehmend mit zunehmender Vorhersageweite)	Mittel bis gut (stabil bei zunehmender Vorhersageweite)
Modellgüte beim Hindcasting; Anwendungsfall Hochwasserfrühwarnung	Gut bis sehr gut (abnehmend mit zunehmender Vorhersageweite)	Sehr gut (abnehmend mit zunehmender Vorhersageweite)	Gut (stabil bei zunehmender Vorhersageweite)
Räumliche Übertragbarkeit	Eingeschränkt (räumlich limitierte Gültigkeit effektiver Parameter)	Eingeschränkt (Training an synthetischen Ganglinien notwendig)	Uneingeschränkt

## 9 Zusammenfassung Teil II

In Pilotstudien wurden Nutzeransprüche, meteorologische Antriebsdaten sowie hydrologische Modellkonzepte untersucht, um einen möglichen Weg hin zu einer Hochwasserfrühwarnung in kleinen, sub-mesoskaligen Einzugsgebieten in Sachsen aufzuzeigen. Dabei wurden die folgenden Erkenntnisse erhalten:

Erstens ist eine Mehrzahl der Befragten Nutzer mit einem Vorhersagezeitraum von 24 Stunden zufrieden zu stellen. Weiterhin wird dem vorhergesagten Maximalwasserstand bzw. Meldestufe eine höhere Bedeutung beigemessen, als der Vorhersage des Zeitpunkts des Eintritts des Hochwasserscheitels.

Zweitens liefern mit probabilistischen numerischen Wettervorhersageprodukten angetriebene hydrologische Modelle für die Kurzfristvorhersage Ergebnisse mit den höchsten Güten, verglichen mit deterministischen NWP-Antrieben oder flächig integrierten Produkten (z. B. DWD-Quantilvorhersage).

Drittens haben die Güteunterschiede der Niederschlagsvorhersagen keinen allzu deutlichen Einfluss auf die Güte der hydrologischen Modellierung.

Viertens kann *per se* keiner der untersuchten Modellansätze gegenüber eines anderen favorisiert werden. Wenn einfache, klassifizierende Modelle hinsichtlich der Nutzeransprüche an eine Frühwarnung (Wird ein bestimmter Schwellenwert innerhalb des Vorhersagezeitraums überschritten, oder nicht? Art des Warnprodukts?) ausreichen, so zeigen die Ergebnisse der entsprechenden Pilotstudie, dass ein solcher Ansatz (ScoHM) unter den gegebenen Anforderungen gut eingesetzt werden kann. Im Gegensatz dazu stehen komplexere, mit aufwändigen Parameterschätzungen verbundene Modellansätze, welche oftmals nur mit Einschränkungen (DeHM, DaHM) regionalisierbar sind.

Es bleibt stets zu beachten, dass insbesondere sehr intensive, seltene und kleinräumige meteorologische Ereignisse in ihrem raum-zeitlichen Auftreten nur unter Einschränkungen vorhersagbar sind und meteorologische Antriebe diesbezüglich ungenügend verifizieren. Vor diesem Hintergrund sind die damit verbundenen Grenzen der Hochwasserfrühwarnung für kleine Einzugsgebiete zu akzeptieren und zu kommunizieren.

## **Teil III**

# **Umsetzung: Ein operationelles Hochwasserfrühwarnsystem für Sachsen**

# 10 Schlüsse aus den Erkenntnissen der Pilotstudien sowie des Projektworkshops

Umfangreiche Voruntersuchungen beziehungsweise Pilotstudien (Projektmeilensteine 1 bis 4 sowie 6 bis 8; siehe Tabelle 3.4.2) behandelten die Aspekte (a) Nutzeransprüche, (b) Qualität meteorologischer Antriebsdaten sowie (c) Eignung hydrologischer Modellansätze für ein sächsisches Hochwasserfrühwarnsystem. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse sind hierin umfassend im Teil II dargestellt.

Zusätzliche Erkenntnisse erbrachte der im November 2015 durchgeführte Projektworkshop (siehe Abschnitt 3.5), beispielsweise hinsichtlich des Zuschnittes von Vorhersagegebieten. Auf Basis dieser Befunde sollen nun in diesem Kapitel Schlüsse gezogen werden, welche letztendlich zu Grobanforderungen für ein operationelles Hochwasserfrühwarnsystem für Sachsen kondensiert werden können (siehe Abschnitt 10.4).

## 10.1 Nutzerstudie

Die wesentlichen aus der Nutzerstudie (Kapitel 5) gezogenen Erkenntnisse waren, dass die Nutzer eines sächsischen Hochwasserfrühwarnsystems vor allem an einer Prognose maximaler Wasserstände interessiert sind, welche einen Vorhersagezeitraum von 12 bis 24 Stunden abdeckt. Weiterhin erbrachte die Studie keinen klaren Befund dahingehend, ob Nutzer probabilistische Vorhersagen akzeptieren, oder gar begrüßen. Ein eher generelles, regionales Frühwarnprodukt wie eine via Internet bereitgestellte (flussgebietsbezogene) „Ampelkarte“ (siehe Abschnitt 1.6.1) wird mehrheitlich befürwortet. Mit Blick auf das zu konzipierende Hochwasserfrühwarnsystem lassen sich die folgenden Ansprüche ableiten:

**Vorhersagezeitraum:** Mindestens 12 bis 24 Stunden, wobei hier zu berücksichtigen ist, dass die Nutzer zum einen eine möglichst akkurate Prognose/Vorhersage wünschen, zum anderen, dass die Unsicherheiten mit der Vorhersageweite anwachsen.

**Aktualisierungsintervall (Update-Zyklus):** Wurde nicht explizit erhoben, sollte allerdings die Aktualisierungshäufigkeiten der QPE- und QPF-Produkte antizipieren.<sup>1</sup>

**Art des Antriebs:** Es ist das Konzept deterministischer Antriebe zu verfolgen, da die nutzerseitige Akzeptanz und Interpretationsfähigkeit probabilistischer Produkte zunächst gestärkt werden muss. Allerdings ist es bei der Auslegung eines Frühwarnsystems wichtig, bei Bedarf probabilistische Antriebe verarbeiten zu können.

**Art des Warnprodukts:** Eine via Internet bereitgestellte Ampelkarte scheint ein verständliches und geeignetes Produkt zur Darstellung (deterministischer) Frühwarninformationen zu sein. Ein Vorteil dieses Produkttyps ist, dass eine gewisse räumliche Generalisierung bei dessen Erstellung erfolgen *muss*. Somit wird der räumlichen Vorhersageunsicherheit ein Stück weit Rechnung getragen und keine Genauigkeit vorgetäuscht, welche nicht erzielbar sein wird.

## 10.2 Studien zur Verifikation meteorologischer Antriebsdaten

Es wurden zwei Verifikationsstudien durchgeführt (siehe Kapitel 6 und 7). Erstens wurden typische deterministische QPEs und QPFs verifiziert; zweitens zusätzlich eine probabilistische QPF in die Untersuchung mit einbezogen. Weiterhin wurde ermittelt, bis zu welcher räumlichen Detaillierung/Größe von Bilanzgebieten sowie Vorhersageweite die entsprechenden QPEs und QPFs noch günstig verifizieren.

<sup>1</sup>Beispielsweise Ombrometerdaten und RADOLAN: 1 h, COSMO-DE: 3 h, Quantilvorhersage: 12 h

Auf der QPE-Seite sind quantitative Radarprodukte hinsichtlich ihrer raum-zeitlichen Auflösung überlegen, erfordern allerdings qualitativ hochwertige Punktbeobachtungen aus einem Niederschlagsmessnetz („Ombrometerdaten“) zur ihrer „Aneichung“. Probabilistische QPFs verifizieren besser als deterministische Produkte; dieser Mehrwert kann aber nur dann auch durch die hydrologische Modellierung propagiert werden, wenn probabilistische Antriebe mit entsprechenden Methoden verarbeitet werden. Für extreme Niederschlagsereignisse ist generell kein deutlicher Nutzen durch quantitative Niederschlagsvorhersagen mehr zu erwarten.<sup>1</sup>

Bei Vorhersageweiten von 24 Stunden (12 h) ist erst ab Bilanzflächengrößen von circa 500 km<sup>2</sup> (200 km<sup>2</sup>) und aufwärts mit einer Stabilisierung der Güten deterministischer Vorhersagen zu rechnen; probabilistische Produkte verifizieren dahingehend signifikant besser. Für kleinere Bilanzflächen (wenige zehn Quadratkilometer) sind die Vorhersagen erratisch und es ist kein prädiktiver Nutzen zu erwarten. Es lassen sich auf Basis der Erkenntnisse aus den Verifikationsstudien mit Blick auf ein Hochwasserfrühwarnsystem die folgenden Schlüsse ziehen:

**QPEs:** Als QPE sind Radarprodukte *unbedingt* als Antrieb zu berücksichtigen; Echtzeit-Ombrometerdaten sollten aber stets als Referenz zum Vergleich mit einbezogen werden.

**QPFs:** Probabilistische QPFs sollten als Antrieb in Erwägung gezogen werden, um den prädiktiven Nutzen von NWP zu maximieren. Sollte das nicht erwogen werden (siehe Abschnitt 10.1), so ist der gegenüber probabilistischen Produkten geringere Nutzen von deterministischen QPFs zu beachten. Generell können nur konvektionserlaubende („convection-permitting“) Atmosphärenmodelle (wie COSMO-DE) Konvektion und Starkregen auf den für die Hochwasserfrühwarnung für kleine Einzugsgebiete relevanten raum-zeitlichen Skalen abbilden. Output von Globalmodellen (wie GFS) ist als Antrieb ungeeignet.

**Güte und Bilanzflächengröße:** Aussagen im Sinne von räumlich gültigen Hochwasserfrühwarninformationen sollten für Flächeneinheiten von 200 bis 500 km<sup>2</sup> aufwärts bereitgestellt werden. Methodisch kann das durch Aggregation/Generalisierung geschehen. Dem

Sinne nach erhält man so eine regionale Information („regionale Hochwassergefährdung“).

**Güte und Vorhersageweite:** Für die angestrebten kurz- und mittelfristigen Vorhersagezeiträume (12 bis 24 Stunden) ist – eingedenk der erörterten räumlichen Abhängigkeit – noch mit einem signifikanten prädiktiven Nutzen von quantitativen Niederschlagsvorhersagen zu rechnen. Für größere Vorhersageweiten verschwindet dieser Nutzen.

## 10.3 Hydrologische Pilotstudie

Die in Kapitel 8 vorgestellte Pilotstudie unternimmt die Bewertungen unterschiedlicher, potentiell als zur Ableitung von Hochwasserfrühwarnungen dienender Modellansätze. Weiterhin wurde untersucht, wie gut/robust diese Ansätze regionalisierbar bzw. für unbeobachtete Gebiete übertragbar sind. Im Ergebnis wurde deutlich, dass Bewertungsverfahren der Hochwasserneigung/-gefährdung (FSAPs; siehe Abschnitt 2.2.3) als Basis für Hochwasserfrühwarnungen einen mit den anderen Modellansätzen vergleichbaren prädiktiven Nutzen gewährleisten können. Gleichzeitig sind diese Ansätze leicht und vor allem robust regionalisierbar. Für ein sächsisches Hochwasserfrühwarnsystem bedeutet das:

**Modellansatz:** Ein klassifizierendes Bewertungsverfahren (wie ScoHM) zur Ableitung der Hochwasserneigung/-gefährdung bietet einen ausgewogenen hydrologischen Modellansatz für den Anwendungsfall Hochwasserfrühwarnung (vergleiche Abschnitt 8.2.2). Gleichzeitig ist dieser Ansatz vergleichsweise leicht zu implementieren und zu betreiben. Für die Vorhersage von Ganglinien ist solch ein Ansatz allerdings klar ungeeignet, weil er dahingehend keinen prädiktiven Nutzen bieten kann (vergleiche Abschnitt 8.2.1).

**Regionalisierbarkeit:** Ein Ansatz wie ScoHM ist ohne Einschränkungen und ohne signifikanten Rückgang der Güte regional übertragbar, was eine wichtige Prämisse hinsichtlich der Hochwasserfrühwarnung für kleine (meist unbepegelte!) Einzugsgebiete ist.

## 10.4 Fazit

In der Zusammenschau der in den Pilotstudien in Teil II untersuchten Aspekte (a) Nutzeransprüche, (b) Qualität

<sup>1</sup> Wobei „erwarten“ hier im statistischen Sinne zu verstehen ist.

meteorologischer Antriebsdaten sowie (c) Eignung hydrologischer Modellansätze, als auch mit Blick auf die Ergebnisse des Projektworkshops (siehe Abschnitt 3.5), lassen sich für die Konzeption eines operationellen Hochwasserfrühwarnsystems für Sachsen die folgenden fachlichen Grobanforderungen ableiten:

- ▶ Vorhersagezeitraum in der Größenordnung von 12 bis 24, eventuell 48 Stunden; idealerweise variabel beziehungsweise anpassbar
- ▶ Verarbeitung sowohl von Radar- als auch stationsbezogenen QPEs
- ▶ Verarbeitung von deterministischen QPFs; potentiell Verarbeitung von probabilistischen QPFs vorsehen (hinsichtlich Mengengerüst, Rechenzeit etc.)
- ▶ Verwendung eines einfachen, robusten Bewertungsverfahrens der Hochwasserneigung/-anfälligkeit (FSAP) als hydrologischen Modellansatz
- ▶ Erzeugung eines regions- und flussgebietsbezogenen Ampelkarten-Produkts zur Hochwasserfrühwarnung (mit drei bis vier Warn- bzw. Gefährdungsstufen)
- ▶ Räumliche Aggregation/Generalisierung von Ergebnissen zu regional gültigen Aussagen für Vorhersagegebiete mittels eines geeigneten Verfahrens (z. B. WARNSIM; siehe Abschnitt 2.7 sowie DEMUTH, 2015)
- ▶ Zuschnitt der Vorhersagegebietsgeometrien anhand von Flussgebietsgrenzen
- ▶ Update des Frühwarnprodukts in regelmäßigen Zeitabständen (beispielsweise aller 3 oder 6 Stunden)
- ▶ Vorsehen der Möglichkeit von Eingriffen eines Experten bei der Produkterstellung
- ▶ Bereitstellung des Produkts via des Webportals des Landeshochwasserzentrums
- ▶ Typisierung der Daten und Konzeption der zugrunde liegenden IT-Verfahren in einer Weise, sodass eine leichte und bruchfreie Weiterverwendung von

Frühwarninformationen durch Zweit- und Drittsysteme möglich ist<sup>1</sup>

Diese Anforderungen sollen die Grundlage der weiteren fachlichen und informationstechnischen (Fein)-Konzeption eines operationellen Frühwarnsystems bilden, welche im folgenden Kapitel 11 detailliert dargestellt wird.

**Schlussfolgerung 32:** *Pilotuntersuchungen sind essentiell wichtig, um die Aspekte Nutzeransprüche, Eignung meteorologischer Antriebsdaten sowie Eignung hydrologischer Modellansätze im Kontext der Hochwasserfrühwarnung fachlich zu beleuchten. Somit kann eine belastbare Basis für die fachliche und technische Spezifikation eines operationellen Hochwasserfrühwarnsystems gelegt werden.* ❖

<sup>1</sup>Dieser Punkt ist besonders im Hinblick darauf wichtig, dass aktuell noch ungeklärt ist, ob ein Frühwarnprodukt auch anders als via Internet verteilt werden soll und eventuell auch ein Produkt im Sinne des amtlichen Hochwassernachrichten- und Alarmdienstes darstellen soll und kann. Mittels eines geeigneten Designs des Frühwarnsystems kann gewährleistet werden, dass Frühwarninformationen/-produkte potentiell auch durch das am LHWZ betriebene Hochwasserinformations- und -managementsystem (HWIMS) verteilt werden können.

# 11 Konzeption und Implementierung eines operationellen Hochwasserfrühwarnsystems für Sachsen

Gemäß des für das Projekt gewählten Vorgehensmodells (siehe Abschnitt 3.4) und den Schlüssen aus den Erkenntnissen der Pilotstudien (Kapitel 10) sieht der Projektmeilenstein Nummer 9 die Konzeption, Implementierung und Operationalisierung einer Perspektive zur Hochwasserfrühwarnung in KALYPSO vor. Die damit verbundenen Aktivitäten werden nun dargestellt. Die inhaltliche Grundlage der folgenden Ausführungen sind die Leistungsbeschreibung (LFULG, 2016c), das Fachkonzept (LFULG, 2016b) sowie die Softwarespezifikation (BCE, 2016b).

## 11.1 Ausgangssituation und Zielsetzung

Derzeit bestehen im Bereich des LHWZ keine zur Ableitung von Produkten für die Hochwasserfrühwarnung geeignete Verfahren. Ausgehend von den Befunden der umfangreichen, hierin dargestellten Voruntersuchungen (siehe Teil II) soll eine Perspektive<sup>1</sup> zur Hochwasserfrühwarnung<sup>2</sup> im Vorhersageframework KALYPSO erstellt werden. Es soll so eine flussgebietsbezogene Ampelkarte der regionalen Hochwassergefährdung als Produkt zur Hochwasserfrühwarnung operationell bereitgestellt werden. KALYPSO wird vom LHWZ auch für die Verwaltung und Bedienung von Modellen zur pegelbezogenen Vorhersage genutzt. Die Perspektive zur Frühwarnung ist ein neu zu konzipierender und zu erstellender Teil der Anwendung KALYPSO, welcher einen für den Anwendungsfall Frühwarnung geeigneten

Workflow (ausgehend von den Eingangs- und Antriebsdaten, über die hydrologische Modellierung, bis hin zur Erstellung eines grafischen Warnproduktes) halbautomatisiert bereitstellt. Die Implementierung eines geeigneten hydrologischen Modellansatzes ist dabei Bestandteil der IT-Lösung.

Es hat sich gezeigt, dass für die Frühwarnung in kleinen, meist unbepegelten Einzugsgebieten eine einfache Scoring-Methodik (z. B. ScoHM) anderen, durchaus aufwändigeren Ansätzen nicht zwingend unterlegen ist (siehe Kapitel 8). Aus diesem Grund soll zunächst dieser Modellansatz prototypisch in der KALYPSO-Perspektive verwendet werden. Die Perspektive soll bis einschließlich der Operationalisierung konzipiert und implementiert werden. Dabei kann auf eine Vielzahl von Schnittstellen und Werkzeugen des Vorhersageframeworks KALYPSO zurückgegriffen werden. Weiterhin kann auf diesem Wege ein einheitlicher fachlicher Workflow (i. S. der bisher bereits implementierten Modellansätze für die pegelbezogene Hochwasservorhersage) dargestellt werden. Die KALYPSO-Perspektive zur Frühwarnung soll dabei aber auch prinzipiell weitere/andere hydrologische Modellansätze einbeziehen können. Abbildung 11.1.1 vermittelt einen visuellen Eindruck des Front-Ends der KALYPSO-Perspektive.

**Schlussfolgerung 33:** *Die Konzeption eines IT-Systems zur Hochwasserfrühwarnung ist anspruchsvoll; zum einen muss ein fachlich einheitlicher Workflow gewährleistet werden, zum anderen soll das System robust für einen teilautomatisierten, operationellen Betrieb sein.* ❖

<sup>1</sup>Laut KALYPSO-Handbuch (BCE & TUHH, 2015) ist eine Perspektive eine eigenständige, gewissermaßen funktional für sich stehende Modellapplikation innerhalb des Dach-Frameworks KALYPSO. Weitere Perspektiven in KALYPSO können beispielsweise sein: pegelbezogene Vorhersage, Zeitreihenbrowser, Administrations-Bereich.

<sup>2</sup>Vereinfachend meint in diesem Kapitel der Begriff „Hochwasserfrühwarnung“ auch die operationelle Ableitung von Produkten zur Abschätzung der regionalen Hochwassergefährdung.

## 11.2 Soll-Modellierung des IT-Systems

Die fachliche Systemstruktur der Hochwasserfrühwarnung passt sich nahtlos in die bestehende Struktur des LHWZ-

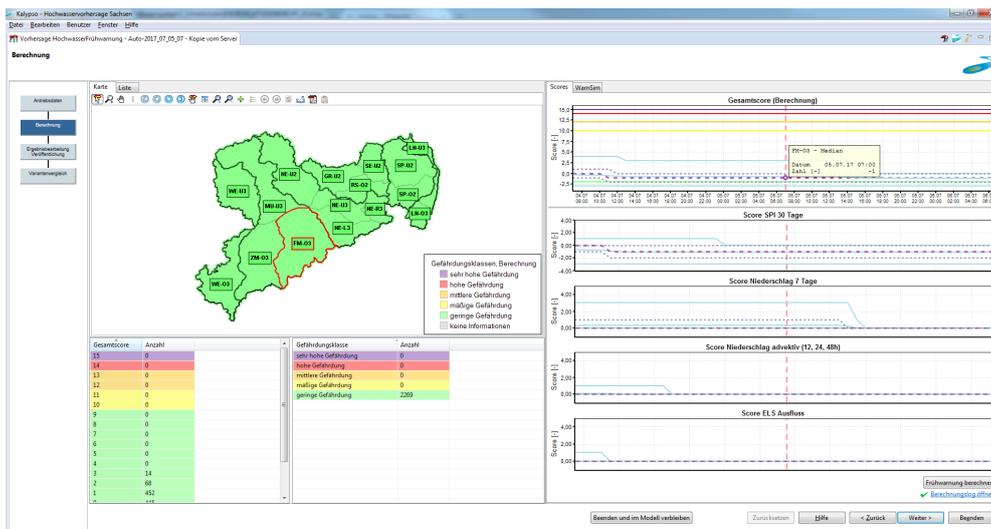


Abbildung 11.1.1: Beispielhafte Ansicht eines Arbeitsschrittes innerhalb der Perspektive „Frühwarnung“ in KALYPSO (Screenshot).

Tabelle 11.2.1: Rollen und Zugriffsrechte für die KALYPSO-Perspektive zur Hochwasserfrühwarnung.

Rolle	Definition	Zugriffsrechte
Vorhersage (Meldedienst)	Anwender, die im hydrologischen Normalfall regelmäßig Frühwarn-Rechenvarianten erstellen bzw. erstellte Varianten veröffentlichen	Reduzierte Funktionalität im Assistenten, keine Administrationsrechte
Experte (Hydrologe)	Fachanwender	Komplette Funktionalität im Assistenten, keine Administrationsrechte
Administrator	Technische Administration der Anwendung	Gesamter Funktionsumfang der Anwendung

Vorhersagesystems ein (siehe BCE & TUHH, 2015; BCE, 2015). Es werden die Funktionen zur Verarbeitung von Rasterdaten erweitert und ein neuer Assistent geschaffen, der den Anwender durch die einzelnen Bearbeitungsschritte führt. Dieser Assistent ähnelt in Aufbau, Struktur und Bedienungsweise den bestehenden Assistenten zur pegelbezogenen Hochwasservorhersage (siehe BCE, 2015). Unbenommen von den nutzerseitigen Möglichkeiten zur Erstellung, Beeinflussung sowie Veröffentlichung von Frühwarnprodukten wird vorgesehen, dass solcherlei Produkte auch automatisch durch das KALYPSO-System bereitgestellt werden können.<sup>1</sup>

### 11.2.1 Prozessgrobmodellierung und Rollenkonzept

Die KALYPSO-Perspektive zur Hochwasserfrühwarnung wird organisatorisch in das am LHWZ bestehende Vorhersagesystem eingebettet. Der dem Nutzer von der pegelbezogenen Vorhersage bekannte Workflow („Wizard“) soll weitestgehend auch für die Frühwarnung übernommen werden. Auf Basis von Leistungsbeschreibung und Fachkonzept (LFULG, 2016c,b) ergeben sich aus einer ersten, groben Modellierung die in Tabelle 11.2.2 aufgeführten Prozesse. Die Leistungsbeschreibung sowie das Fachkonzept fordern ein Rollenkonzept zur Zuweisung und Verwaltung von nutzerspezifischen Rechten. Die im Bestandssystem vorhandenen Rollen „Vorhersage“, „Experte“ sowie „Administrator“ werden weiterverwendet. Die Rollen sind gemäß Tabelle 11.2.1 definiert und mit entsprechenden Rechten belegt.

<sup>1</sup>Und zwar in Form sog. „automatischer Rechenvarianten“, wie bereits bei den pegelbezogenen Vorhersagen mehrmals täglich praktiziert.

**Tabelle 11.2.2:** Fachprozesse der KALYPSO-Perspektive zur Hochwasserfrühwarnung im Ergebnis der Prozessgrobmodellierung.

ID	Fachprozess
1	Perspektive Hochwasserfrühwarnung
1.1	Hochwasserfrühwarnung erstellen
1.2	Hochwasserfrühwarnung automatisiert erstellen
1.3	Bestehende Hochwasserfrühwarnung öffnen
1.4	Bewertung editieren
1.5	Daten exportieren
2	Perspektive xyz
2.1	...

## 11.2.2 Detaillierte Fachprozesse und Anwendungsfälle

Tabelle 11.2.3 detailliert die umzusetzenden Fachprozesse hinsichtlich beteiligter Rollen, Häufigkeit der Ausführung sowie dem erzeugten Output. Der Gesamtprozess „Hochwasserfrühwarnung“ basiert auf der Verarbeitung von Rasterdaten (beispielsweise Radar-QPEs, diverse QPFs), welche mit den bereits für KALYPSO bestehenden Mitteln erfolgt. Die erforderliche Datenverarbeitung wird in einem separaten Datenverarbeitungskonzept (DV-Konzept) beschrieben (BCE, 2016a), dessen wichtigste Aspekte in Abschnitt 11.3 dargestellt werden. Die Fachprozesse und Anwendungsfälle werden über einen gemeinsamen Assistenten ausgeführt. Der prinzipielle Ablauf entspricht dem der Assistenten für die pegelbezogene Vorhersage<sup>1</sup> im Bestandssystem und gliedert sich in folgende Schritte:

1. Anlegen/öffnen einer Frühwarnung (Rechenvariante)
2. Eingabe Modellparameter (Steuerparameter und Metadaten; beispielsweise Vorhersagezeitraum)
3. Auswahl Inputparameter (Eingangsdaten bzw. Antriebsdaten; beispielsweise bestimmte QPE-QPF-Kombination)
4. Ergebnisse (beispielsweise Ampelkarte und Zeitreihen) sichten
5. Veröffentlichung
6. Variantenvergleich
7. (Administration)

<sup>1</sup>Hier ist von den Assistenten im Plural die Rede, da für jedes Flussgebiet (beispielsweise Weiße Elster, Mulde etc.) ein eigenständiger Assistent in KALYPSO existiert.

Bezogen auf das Rollenkonzept (siehe Tabelle 11.2.1) ergeben sich gewisse Berechtigungen der Nutzerrollen im Hinblick auf die genannten Anwendungsfälle, welche Tabelle 11.2.4 zu entnehmen sind. Die durch die Anwendung erstellten Dokumente und Metadaten werden zunächst intern genutzt. Dieses Vorgehen setzt insbesondere keine Anforderungen Dritter um. Alle für das avisierte Frühwarnprodukt (Ampelkarte) relevanten Informationen werden im sogenannten Bericht zusammengefasst, intern abgelegt und so auch weiteren Verfahren (beispielsweise Veröffentlichung auf dem LHWZ-Webportal, Veröffentlichung auf weiteren Plattformen, wie Twitter etc.) zugänglich gemacht. Für die Veröffentlichung/Verteilung von Frühwarnprodukten lag zum Zeitpunkt der Konzeption und Implementierung des IT-Systems noch kein abgestimmtes Vorgehensmodell vor. Zu klären ist in dieser Hinsicht beispielsweise die Rolle/Bedeutung eines Produkts zur Hochwasserfrühwarnung vor dem Hintergrund der Hochwassernachrichten- und Alarmdienstverordnung (HWNVO, 2015) sowie der Hochwassermeldeordnung (HWMO, 2015; siehe dazu auch Abschnitt 11.4).

## 11.2.3 Nicht-funktionale Anforderungen

Generell bestehen keine nicht-funktionalen Anforderungen, welche über die Anforderungen des Bestandssystems hinausgehen. Folgende Teilaspekte im Bereich nicht-funktionaler Anforderungen wurden bei der Konzeption des IT-Systems mit berücksichtigt:

**Informationssicherheit:** Das Sicherheitskonzept entspricht dem des zugrunde liegenden IT-Systems KALYPSO. Wesentliche Erfordernisse der IT-Sicherheit werden dadurch erfüllt, dass das System über keine externen Schnittstellen verfügt sowie redundant ausgelegt ist (in Hard- und Software sowie hinsichtlich der betrieblichen Infrastruktur).

**Datenmengen und Antwortzeitverhalten:** Das System selbst umfasst keine Datenbankanwendung für die Langzeitaufbewahrung. Lediglich für den operationellen Betrieb sowie ereignisnahe Hindcast-Szenarien werden die Rasterdaten in der Rasterdatenbank vorgehalten, derzeit für 40 Tage. Die Berichte (siehe Abschnitt 11.2.2) hingegen werden innerhalb der HWIMS-Datenbank versioniert und langzeitgespeichert (mindestens 10 Jahre). Für das Antwortzeitverhalten des Systems gab es keine besonderen Vor-

Tabelle 11.2.3: Detaillierte Fachprozesse für die KALYPSO-Perspektive zur Hochwasserfrühwarnung.

ID	Fachprozess	Beschreibung, Aufgabe	Handelnde Rolle(n)	Häufigkeit	Output
1	Hochwasserfrühwarnung	Sachsenweite Hochwasserfrühwarnung, bezogen auf Vorhersagegebiete auf Grundlage eines Bewertungsmodells (FSAP)	Melddienst, Hydrologe, Administrator	–	Rechenvariante, Bericht <sup>§</sup>
1.1	Hochwasserfrühwarnung erstellen	Für einen Vorhersagezeitpunkt muss der Benutzer eine Hochwasserfrühwarnung (Rechenvariante) mit einem gewählten Vorhersagezeitraum assistenzgestützt erstellen können	Hydrologe	Bei Bedarf	Rechenvariante
1.2	Hochwasserfrühwarnung automatisiert erstellen	Für festgelegte Vorhersagezeitpunkte und Vorhersagezeiträume müssen Hochwasserfrühwarnungen (Rechenvarianten) automatisiert erstellt werden	–	4 bis 8 mal täglich	Rechenvariante
1.3	Bestehende Hochwasserfrühwarnung öffnen	Eine bestehende Hochwasserfrühwarnung (Rechenvariante) muss erneut geöffnet und visualisiert werden können	Melddienst, Hydrologe	–	–
1.4	Bewertung editieren	Der Benutzer muss die endgültige Klassifizierung der Hochwassergefährdung für die Vorhersagegebiete von Hand setzen können („Experteninschätzung“)	Melddienst, Hydrologe	–	–
1.5	Daten exportieren	Daten und abgeleitete Produkte (z. B. Bilder, Metadaten) müssen für die weitere Verwendung bereitgestellt werden; das muss auch im automatischen Betrieb gewährleistet sein.	Melddienst, Hydrologe	–	Rechenvariante, Bericht

<sup>§</sup>Eine Rechenvariante ist die Gesamtheit aus Input-, Prozess- sowie Modellparametern, also eine vollständige Modellinstanz. Ein Bericht beinhaltet gesammelt Modellergebnisse, beispielsweise Metadaten (Erstellungszeitpunkt, Gültigkeitsdauer), Ergebniskarten („Ampelkarte“) usw.

**Tabelle 11.2.4:** Berechtigungen der Nutzerrollen im Hinblick auf die genannten Anwendungsfälle für die KALYPSO-Perspektive zur Hochwasserfrühwarnung.

Anwendungsfall	Meldedienst (Vorhersage)	Hydrologe (Experte)	Administrator
Anlegen/öffnen Rechenvariante	Nur öffnen	✓	✓
Eingabe Modellparameter	Nur lesen	✓	✓
Auswahl Inputparameter	✗	✓	✓
Ergebnisse sichten	✓	✓	✓
Veröffentlichung	✓	✓	✓
Variantenvergleich	✓	✓	✓
Administration	✗	✗	✓

gaben, da entsprechend der konzipierten und umgesetzten Datenverarbeitung (siehe Abschnitt 11.3) insgesamt nur geringe Abarbeitungszeiten zu erwarten sind, welche für die fachlichen Abläufe unerheblich sind.

**Technische Anforderungen:** Das Hochwasserfrühwarnsystem wird im Rahmen des Bestandssystems implementiert. Es werden keine Änderungen/Erweiterungen hinsichtlich der technischen Anforderungen des Bestandssystems benötigt. Allerdings führen die implementierten Rasteroperationen (siehe Abschnitt 11.3) möglicherweise zu einer erhöhten Plattenlast, was in der endgültigen Ausbauphase es möglicherweise notwendig machen wird, die Kapazitäten zu erweitern (beispielsweise mit performanteren Solid-State-Platten).

**Schnittstellen zu Zweitsystemen:** Das Vorhersagesystem KALYPSO steuert die im LHWZ betriebenen Berechnungsmodelle. Viele zur Modellrechnung benötigten Daten werden durch das zentrale Hochwasserinformations- und -managementsystem (HWIMS; MÜLLER ET AL., 2016) bereitgestellt, welches wiederum Modellergebnisse visualisiert und zur Veröffentlichung aufbereitet. Die Integrationsstruktur mit HWIMS entspricht der der pegelbezogenen Vorhersage (siehe BCE & TUHH, 2015; BCE, 2015). HWIMS tritt also sowohl als Quellsystem (z. B. für Antriebsdaten), als auch als Zielsystem (Berichtsablage) auf, wobei KALYPSO als eigener HWIMS-Nutzer agiert. Frühwarn-Berichte werden als sog. „Dokument“ in HWIMS abgelegt.

**Abhängigkeiten zu anderen Projektphasen:** Es bestehen keine Abhängigkeiten zu vorangegangenen und nachfolgenden Projektphasen (vgl. Abschnitt 3.4); dar-

aus ergeben sich keine weiteren Anforderungen an das IT-System.

**Schlussfolgerung 34:** Weitere wichtige Anforderungen an ein IT-System zur Hochwasserfrühwarnung sind das Ansprechen verschiedener Publikationsschnittstellen sowie die Möglichkeit manueller Eingriffe. ❖

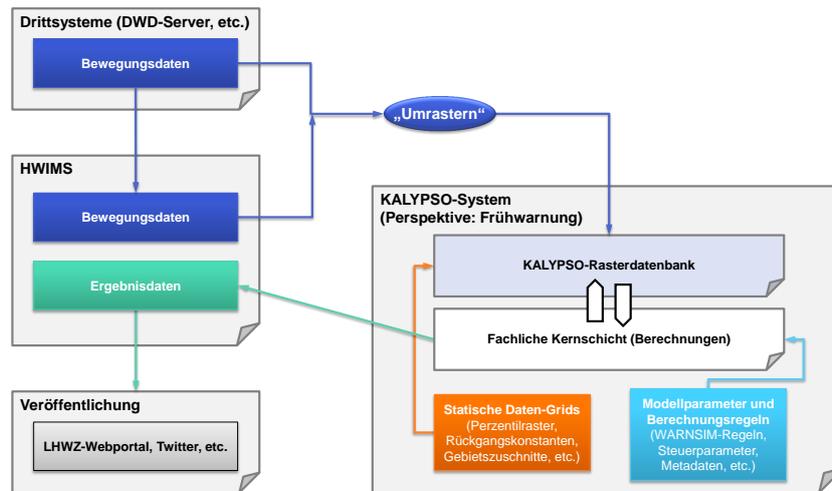
## 11.3 Fachliche Daten und Datenverarbeitung

Im Folgenden soll knapp das Datenverarbeitungskonzept (BCE, 2016a) vorgestellt werden, was die Erweiterung des Prognosesystems KALYPSO um Funktionalitäten zur Ableitung von Produkten zur Abschätzung der regionalen Hochwassergefährdung („Frühwarnung“) methodisch untersetzt. Es wird der fachliche Workflow dargestellt, ebenso wird die Methodik der Datenverarbeitung präsentiert. Abbildung 11.3.1 zeigt den Ablauf der fachlichen Datenverarbeitung zwischen der KALYPSO-Perspektive zur Hochwasserfrühwarnung sowie Zweit- (HWIMS) und Drittsystemen (z. B. FTP-Server des DWD).

### 11.3.1 Workflow im KALYPSO-Assistenten zur Frühwarnung

Der bereits im Abschnitt 11.2.2 skizzierte Workflow in der KALYPSO-Perspektive zur Frühwarnung wird folgendermaßen umgesetzt:

- 1. Anlegen/öffnen Rechenvariante:** Im ersten Arbeitsschritt („Startseite“) kann die neue Perspektive „Hochwasserfrühwarnung“ über einen Knopf geöffnet werden. Es öffnet sich direkt das Fenster „Frühwarnung starten“ mit den folgenden Funktionen:



**Abbildung 11.3.1:** Ablauf der fachlichen Datenverarbeitung zwischen der KALYPSO-Perspektive zur Hochwasserfrühwarnung sowie Zweit- und Drittsystemen, bis hin zur Veröffentlichung. Für Details siehe Text.

- Neue Frühwarn-Variante erzeugen (Vorhersage)
- Neue Frühwarn-Variante erzeugen (Hindcast)
- Vorhandene Frühwarn-Variante öffnen
- Vorhandene Frühwarn-Variante duplizieren
- Auf dem Server archivierte Frühwarn-Variante holen
- QPE-seitig: Ombrometerdaten, RADOLAN-RW, SNOW4-Daten (Wasserdargebot)<sup>1</sup>
- QPF-seitig: COSMO-DE, ICON-EU, Quantilvorhersage der DWD-RWB Leipzig (mit 3 Membern; siehe Abschnitt 6)

**4. Ergebnisse sichten (Ampelkarte und Zeitreihen):**

Für den Vorhersagezeitraum wird eine Ampelkarte angezeigt (siehe Abbildung 11.1.1). Die ermittelten Gesamtscores werden hierfür für den betreffenden Zeitbereich pro Rasterzelle (per Maximumbildung) flussgebiets- bzw. vorhersagegebietsbezogen aggregiert. Über die Schwellenwerte (Klasseneinteilung administrierbar; siehe Punkt „Administration“) wird jeder Rasterzelle eine Klasse bzw. ein verbal beschriebener Gefährdungsstatus zugewiesen.<sup>2</sup> Über eine angepasste WARNSIM-Methodik (siehe Tabelle 11.3.2 und vergleiche Abschnitt 2.7) werden den Vorhersagegebieten ihre Gefährdungsklassen zugewiesen. Ein Beispiel für diese Zuweisung findet sich in Abbildung 11.3.2. Die Schwellenwerte und die Regeln der Systematik können administriert werden,

**2. Eingabe Modellparameter:** Eingabe bzw. Ansicht von Modellparametern und Metadaten; folgende Datensätze beschreiben eine Rechenvariante:

- Simulationszeitraum, vorbelegt mit 24 h (Zeitraum vor dem Vorhersagezeitpunkt, welcher im Modell berücksichtigt wird)
- Vorhersagezeitpunkt
- Vorhersagezeitraum, vorbelegt mit 24 h (administrierbar)
- Name der Variante, Ersteller, verbale Beschreibung, Kommentar, Erstellungszeitpunkt

**3. Auswahl Inputparameter (Antriebsdaten):** Das implementierte Scoring-Modell bewertet beobachtete sowie vorhergesagte Niederschläge (QPEs/QPFs; siehe auch Abschnitt 2.1). Für die Abdeckung des Simulations- sowie Vorhersagezeitraums mit Daten müssen QPEs und QPFs zum Vorhersagezeitpunkt zusammengefügt werden (vergleiche Abbildung 1.4.1). Die folgenden Produkte stehen zur Verfügung, wodurch sich 12 QPE/QPF-Kombinationen ergeben:

<sup>1</sup>Bei SNOW4 handelt es sich um ein vom DWD betriebenes operationelles und physikalisch basiertes (Strahlungsbilanz) Schneemodell, welches im Winterhalbjahr u. a. Wasserdargebote für hydrologische Anwendungen liefert.

<sup>2</sup>Der Gefährdungsstatus wiederum kann – zumindest näherungsweise – mit Hochwasserjährlichkeiten in Verbindung gebracht werden. Siehe dazu beispielsweise Tabelle 8.1.6 für eine Zuordnung für die Gesamtscore-Schwellenwerte der Ausgangskonfiguration.

**Tabelle 11.3.1:** Zuordnung eines Gefährdungsstatus  $S$  in Abhängigkeit vom Gesamtscore nach ScoHM-Methodik (METZKES, 2016); Ausgangskonfiguration.

Regel	Gesamtscore, z. B. für einen Pixel	Zugeordneter Gefährdungsstatus, z. B. für einen Pixel
1	< 10	$S_0$ (geringe Gefährdung)
2	< 12	$S_1$ (mäßige Gefährdung)
3	< 14	$S_2$ (mittlere Gefährdung)
4	< 15	$S_3$ (hohe Gefährdung)
5	= 15	$S_4$ (sehr hohe Gefährdung)

**Tabelle 11.3.2:** Für das Scoring-Verfahren angepasste, pixelbasierte WARNSIM-Methodik (vergleiche mit Tabelle 2.7.1); Ausgangskonfiguration. Algebraisch korrekt werden die Regeln von unten nach oben ausgewertet.

Regel	Status-Häufigkeiten in Vorhersagegebieten als Anteil der Gebietsfläche	Zugeordneter Gefährdungsstatus des gesamten Vorhersagegebiets
1	–	= $G_0$
2	3% > $S_4$	= $G_1$
3	10% > $S_3$	= $G_1$
4	25% > $S_2$	= $G_1$
5	50% > $S_1$	= $G_1$
6	15% > $S_4$	= $G_2$
7	50% > $S_2$ und 75% > $S_1$	= $G_2$
8	25% > $S_3$ und 100% > $S_1$	= $G_2$
9	75% > $S_2$	= $G_2$
10	50% > $S_3$ und 75% > $S_2$	= $G_3$
11	25% > $S_4$ und 100% > $S_2$	= $G_3$
12	75% > $S_3$	= $G_3$
13	50% > $S_4$ und 75% > $S_3$	= $G_4$
14	25% > $S_4$ und 100% > $S_3$	= $G_4$
15	75% > $S_4$	= $G_4$

sie gelten einheitlich für alle Gebiete. Das System ist somit beispielsweise nicht auf eine bestimmte Anzahl an verschiedenen Gefährdungsklassen festgelegt (aktuell 1 plus 4 Stufen – geringe, mäßige, mittlere, hohe sowie sehr hohe Gefährdung).<sup>1</sup>

Für das jeweils ausgewählte Vorhersagegebiet werden Scores in Diagrammen für den Gesamtzeitraum (Simulationszeitraum und Vorhersagezeitraum) angezeigt. Die Scores werden mit Minimum, unterem Quartil, Median, Mittelwert, oberem Quartil und

<sup>1</sup>Die Benennung der Stufen ist ebenfalls durch den Administrator frei wählbar.

Maximum jeweils als Ganglinie angezeigt. Um die Übersichtlichkeit der Darstellung zu wahren, werden fünf Diagramme angezeigt (jeweiliger Score plus genannte statistische Größen):

- Gesamtscore (gebildet nach METZKES, 2016; Details siehe Abschnitt 11.3.2 ff.)
- SPI über 30 Tage<sup>2</sup>
- Niederschlagssumme über 7 Tage
- Niederschlagssumme über 12, 24 und 48 Stunden
- Ausfluss eines mit stündlichen Niederschlägen beaufschlagten Einzellinearspeichers

Zusätzlich werden die Grenzen der Klasseneinteilung für den Gesamtscore durch waagerechte Linien angezeigt (entsprechend der konfigurierten Schwellenwerte gemäß Tabelle 11.3.1).

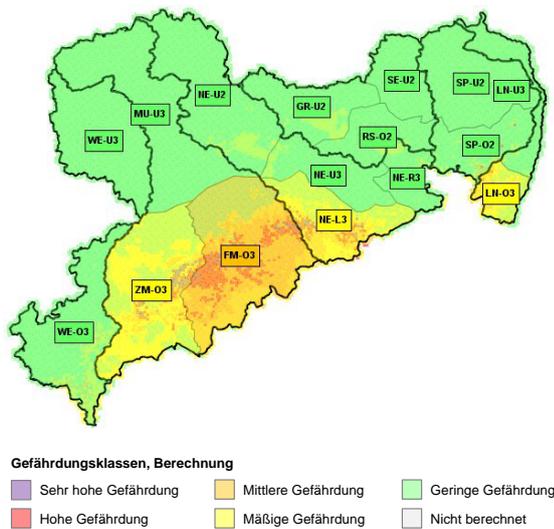
**5. Veröffentlichung:** Im entsprechenden Arbeitsschritt kann der durch die Vorhersage-Methodik (ScoHM) ermittelte Gefährdungsstatus händisch editiert werden. Hier ist es also möglich, eine Experteneinschätzung direkt und pragmatisch in die Ergebnisse mit zu übernehmen. Neben der Archivierung einer Rechenvariante auf dem Server (Rechenvariante steht dann für Punkt „anlegen/öffnen einer Rechenvariante“ zur Verfügung) kann hier die Erstellung und Ablage des Berichts ausgelöst werden. Konkret enthält der elektronische Bericht:

- Ampelkarte als Bilddatei
- Gefährdungsstatus der Vorhersagegebiete („Warnstufen“) sowie Geometrie der Vorhersagegebiete als georeferenzierte Daten (z. B. GeoJSON-Format)<sup>3</sup>

<sup>2</sup>Der standardisierte Niederschlagsindex (Standardized Precipitation Index, SPI) ist ein gängiges Maß zur statistischen Einordnung einer Niederschlagssumme über einem bestimmten Zeitraum. Je nach Länge des Zeitraumes (in der Regel 1, 3, 6, 12, 24 Monate) gibt der SPI Aufschluss über verschiedene Komponenten des Wasserhaushaltes. Während der einmonatige SPI Aussagen über etwaigen Trockenstress bei Nutzpflanzen erlaubt, dient der 24-monatige SPI als Indikator für die Grundwasserneubildung. Siehe dazu auch EDWARDS & MCKEE (1997).

<sup>3</sup>GeoJSON steht für „Georeferenzierte JavaScript Object Notation“ und ist ein kompaktes Datenformat auf XML-Basis (steht für Extensible Markup Language). Damit ist z. B. die komfortable Online-Erzeugung einer Warnkarte möglich, beispielsweise mit Frameworks wie OpenLayers oder Leaflet.

**Hochwasserfrühwarnung mit ScoHM und WARNSIM-Aggregation**  
Vorhersagezeitpunkt: 22.02.2017, 09:00 UTC; Vorhersagezeitraum: 24 h



**Abbildung 11.3.2:** Beispiel der Wirkung der angepassten WARNSIM-Methodik (vergleiche Tabelle 11.3.2) bei der Aggregation von rasterweisen Ergebnissen auf Basis von ScoHM zu integralen Informationen für die 16 Vorhersagegebiete; die Grafik wird in KALYPSO gerendert. Vorhersagezeitpunkt: 22.02.2017, 09:00 UTC; Vorhersagezeitraum: 24 h.

- Standard-Metadaten, wie Produktname, Erstellungszeitpunkt, Gültigkeitsdauer (mit in XML-Ausgabedatei)
- Spezielle Metadaten, wie (die administrierbaren) RGB-Farbcodes der Gefährdungsstufen (mit in XML-Ausgabedatei)
- Manuell erzeugter Meta-Text zur Warnung („Kurzbericht“); auch spezifisch für einzelne Vorhersagegebiete im Assistenten eingebbar (mit in XML-Ausgabedatei)

Der Bericht wird als Archiv-Datei (ZIP) im Hochwasserinformations- und -managementsystem des LHWZ (HWIMS) revisionssicher für mindestens zehn Jahre abgelegt und kann von dort aus über verschiedene Kanäle weiterverteilt werden (siehe dazu auch Abschnitt 11.2.3).

**6. Variantenvergleich:** Hier ist der Vergleich verschiedener Rechenvarianten möglich, beispielsweise um die Auswirkungen unterschiedlicher QPE/QPF-Kombinationen auf die Modellergebnisse zu evaluieren. Es werden sowohl Ganglinien der Score-Verläufe, als auch Ampelkarten nebeneinandergestellt.

**7. Administration:** Erforderliche bzw. mögliche Konfigurationen können auf einer gesonderten Administrationsseite durch einen Administrator vorgenommen werden (Benutzer mit der Rolle „Administrator“). Administrierbar sind:

- Vorhersagezeitraum (6, 12, 18 oder 24 h); wird zur Vorbelegung beim Erstellen einer neuen Frühwarnung und für die automatisch erzeugten Frühwarnungen herangezogen (siehe auch Punkt „anlegen/öffnen Rechenvariante“)
- Schwellenwerte für die Klassifizierung der Gesamtscore-Maximalwerte innerhalb des Vorhersagezeitraums (siehe Punkt „Ergebnisse sichten“ und Tabelle 11.3.1)
- WARNSIM-Klasseneinteilung des Gesamtscores (siehe Punkt „Ergebnisse sichten“) zur räumlichen Aggregation der rasterweise abgeleiteten Scoring-Ergebnisse auf die Vorhersagegebiete
- Quantil-Schwellenwerte für das Niederschlags-Scoring (siehe Abschnitt 11.3.3)

Die Warteschlange und die bereits erfolgte Abarbeitung von automatisch erstellten Frühwarnungen kann auf einem Reiter der Administrator-Perspektive eingesehen werden. Je nach Umsetzung werden die Frühwarnungen über eine eigene Warteschlange abgearbeitet oder in die Warteschlange der automatisch erstellten Vorhersagen mit integriert.

### 11.3.2 Die Ermittlung von Teilscores

Zur Ermittlung der für die Bewertung des Gefährdungsstatus (und damit in letzter Instanz der regionalen Hochwassergefährdung) relevanten „Scores“ kommt das ScoHM-Verfahren zum Einsatz (METZKES, 2016). Die Berechnung erfolgt dabei rasterbasiert; pro Rasterzelle werden sog. Teilscores addiert und ergeben den Gesamtscore, welcher einen Wertebereich von –3 bis 15 aufweist. Die fachliche Bildung der Teilscores soll nun etwas näher beleuchtet werden. Zur technischen Ermittlung der Teilscores siehe Abschnitt 11.3.5.

**SPI der vergangenen 30 Tage:** Hierbei handelt es sich um den stundenweise für den Gesamtzeitraum (Simulations- sowie Vorhersagezeitraum) bestimmten SPI über 30 Tage. Der Wertebereich des Teilscores beträgt –3 bis +3. Der Teilscore basiert auf dem tatsäch-

lichen SPI-Wert. Für 12 QPE/QPF-Kombinationen, angenommene vier Vorhersagen pro Tag sowie einen Simulations- und Vorhersagezeitraum von 24 plus 24 Stunden ergeben sich hier  $12 \cdot 4 \cdot (24 + 24) = 2.304$  Rasterfelder pro Tag.

**Niederschlagssumme über 7 Tage:** Die Niederschlagssumme der vergangenen 7 Tage; wieder stundenweise für den Gesamtzeitraum bestimmt (gleiches Mengengerüst wie beim SPI); Wertebereich des Teilscores beträgt 0 bis 4. Die Zuordnung der Teilscores erfolgt anhand von Niederschlagsperzentilen.

**Niederschlagssumme (12/24/48 Stunden):** Die Niederschlagssumme der vergangenen 12/24/48 Stunden; wieder stundenweise für den Gesamtzeitraum bestimmt (gleiches Mengengerüst wie beim SPI); Wertebereich des Teilscores beträgt 0 bis 4. Die Zuordnung der Teilscores erfolgt anhand von Niederschlagsperzentilen mit anschließender Maximalwertbildung (nur der größte Wert trägt zum Gesamtscore bei).

**Ausfluss eines Einzellinearspeichers:** Der klassifizierte Ausfluss eines mit Stundenniederschlägen beaufschlagten Einzellinearspeichers; wieder stundenweise für den Gesamtzeitraum bestimmt (gleiches Mengengerüst wie beim SPI); Wertebereich des Teilscores beträgt 0 bis 4. Die Zuordnung der Teilscores erfolgt anhand von Perzentilen des Ausflusses.

### 11.3.3 Grundlagendaten (statische Daten)

Das beschriebene Vorgehen zur Ableitung der regionalen Hochwassergefährdung erfordert bei Nutzung des nun implementierten ScoHM-Ansatzes („Scoring“) die Vorab-Erhebung einer Reihe von Grundlagendaten, um beispielsweise aktuelle Bewegungsdaten (z. B. eine 7-d-Niederschlagssumme) zu einem Teilscore zuordnen zu können. Diese Grundlagendaten liegen als jederzeit austauschbare, zeitlich invariante Raster-Grids vor und sollen nun beschrieben werden.

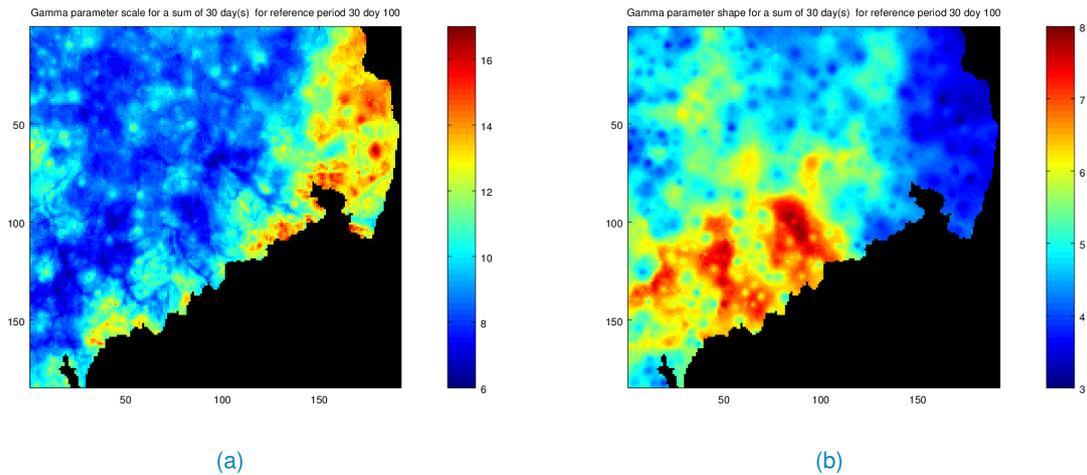
**SPI-Verteilungsparameter:** Der SPI basiert auf einer für die Niederschlagsdaten (30-d-Summen) einer Referenzperiode (hier 1981 bis 2010) gefittete zweiparametrische Gammafunktion (Lage- und Formparameter). Der Wert des SPI stellt die Anzahl an Standardabweichungen<sup>1</sup> dar, um welche die aktuelle Niederschlagssumme über/unter der Niederschlagssumme des Referenzzeitraumes liegt. Die Fits wurden im Vorfeld automatisiert für gerasterte Tagesniederschläge (DWD-REGNIE) für jeden Tag des Jahres erstellt. Es ergeben sich somit  $2 \cdot 365 = 730$  Rasterfelder; beim SPI-Scoring wird operationell an jedem Tag auf einen anderen räumlich verteilten Parametersatz zurückgegriffen (in einem Schaltjahr wird der 29.02. als 28.02. behandelt). Abbildung 11.3.3 zeigt beispielhaft jeweils ein Feld für jeden der beiden Parameter.

#### Quantile (Perzentile) für das Niederschlagsscoring:

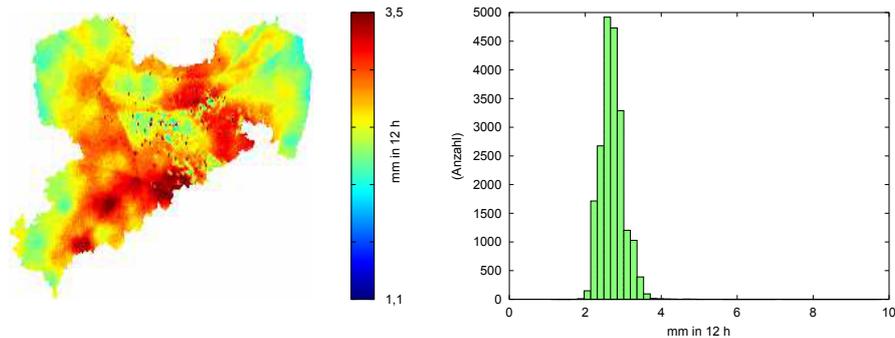
Gemäß der in KALYPSO implementierten ScoHM-Methodik werden die Niederschlagssummen für 7 d sowie 12, 24 und 48 h anhand der 75/90/95/99er-Perzentile zu Teilscores zugeordnet (Mengengerüst: für jede zeitliche Aggregation ein Perzentilraster mit vier Klassengrenzen). Für tägliche und übertägliche Aggregationen kann dafür direkt auf den gerasterten Tagesniederschlags-Datensatz DWD-REGNIE zurückgegriffen werden, welcher anhand geprüfter und korrigierter Stationsdaten via räumlicher Interpolation erstellt wird. Für eine sub-tägliche Niederschlagsklimatologie sind Stationswerte nur bedingt zu verwenden, da die räumliche Variabilität mit kleiner werdendem Aggregierungszeitraum zunimmt, sodass man hier allerdings auf Radar-QPEs oder Methoden der Disaggregation angewiesen ist. Leider sind die klimatologischen Eigenschaften von Radar-QPEs häufig schlecht (siehe auch WINTERRATH ET AL., 2016 sowie Abbildung 11.3.4).

Aus den genannten Gründen wurde daher eine eigene Methodik zur Ableitung einer sub-täglichen Niederschlagsklimatologie als Basis zur Festlegung von Perzentil-Schwellenwerten entwickelt und angewendet (siehe Abbildung 11.3.5): Aus den sub-täglichen, aus dem RADOLAN-RW-Produkt abgeleiteten Aggregationen (z. B. 12-h-Summen) werden zunächst flächenhaft Perzentile bestimmt (75/90/95/99er-Perzentile; Abbildung 11.3.5, unten links; für Stundenwerte bereits für ELS-Ausflüsse; siehe nächster Punkt); für jede Zeitstufe gibt es also vier Häufigkeitsverteilungen. Aus diesen Verteilungen wird

<sup>1</sup>Das Abweichungsmaß wird unter der Annahme einer normalverteilten Varianz mittels Standardnormalverteilung geschätzt (siehe Gleichung 11.3.1).



**Abbildung 11.3.3:** (a) Lage- und (b) Formparameter für eine angepasste zweiparametrische Gammafunktion, beispielhaft für 30-d-Niederschlagssummen der Referenzperiode 1981 bis 2010 für den 100. Tag des Jahres.



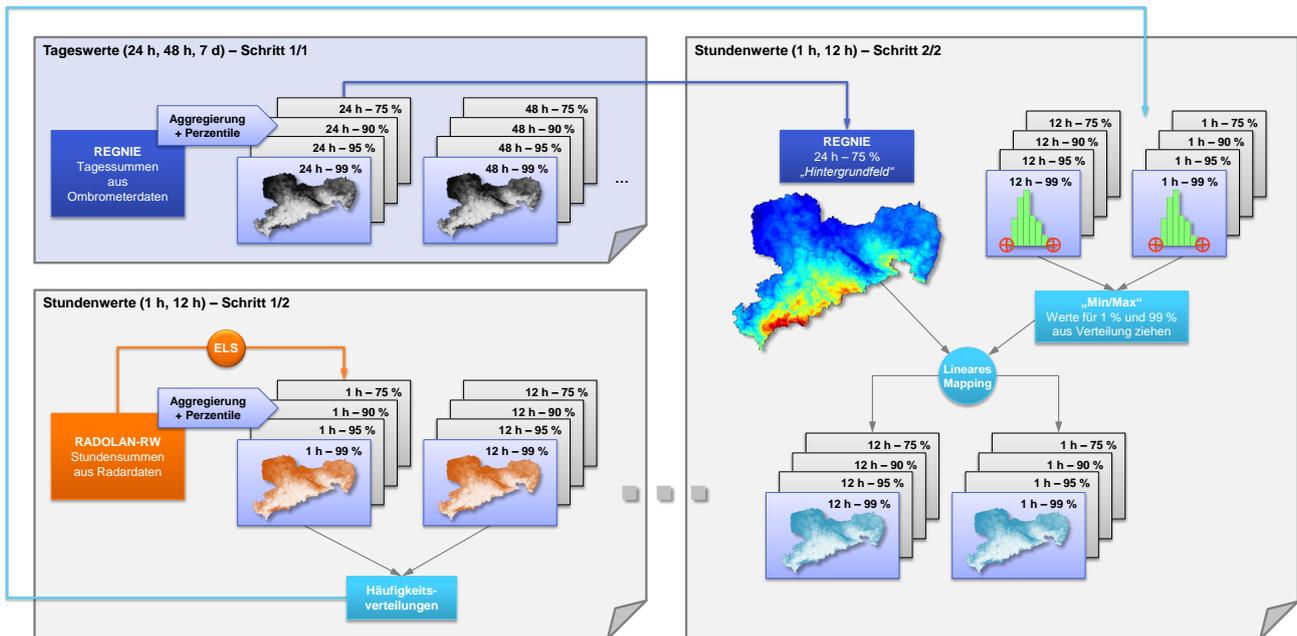
**Abbildung 11.3.4:** Darstellung der räumlichen (links) sowie Häufigkeitsverteilung (rechts) des aus RADOLAN-RW-Aggregationen (12 Stunden) gezogenen 90er-Perzentils des Niederschlags. Erkennbar sind drei für eine Klimatologie nachteilige Effekte: Clutterfehler („Einsprengsel“), v. a. im Bereich Mittelsachsen (mutmaßlich durch den Einfluss von Windkraftanlagen); Inkonsistenzen durch Kompositierung (kreisbogenförmige Kanten) aus Daten unterschiedlicher Einzelradare sowie Durchprägung von Einzelereignissen aufgrund der relativen Kürze von verfügbaren radarbasierten QPEs (rund zehn Jahre für RADOLAN).

dann das 1er- und das 99er-Perzentil bestimmt (als skalarer Wert; Abbildung 11.3.5, rechts oben). Nun gibt es also für jede Zeitstufe (z. B. 12 h) ein 1er und 99er-Perzentilwert für das 99er-Feld usw. Diese Tupel werden nun via linearem Mapping<sup>1</sup> einem Hintergrundfeld „aufgeprägt“, wobei das 75er-Perzentilfeld des aus REGNIE abgeleiteten 24-h-Niederschlags verwendet wird. Das Ergebnis ist eine räumlich konsistente, sub-tägliche Niederschlagsklimatologie, welche

die aus dem RADOLAN-RW-Produkt abgeleiteten Häufigkeitseigenschaften widerspiegelt.

**Quantile (Perzentile) für Ausfluss ELS:** Für die Häufigkeitsanalyse (Ableitung von Perzentilen) des im ScoHM-Modell eingehenden stündlichen Ausflusses eines Einzellinearspeichers wurde die bereits beschriebene Mapping-Methodik (siehe Abbildung 11.3.5) verwendet. Der Unterschied gegenüber dem Vorgehen für die 12-h-Summen ist, dass die RADOLAN-RW-Stundenwerte erst durch den ELS transformiert (zum ELS siehe Abschnitt 11.3.5) und dann der Häufigkeitsauswertung wie beschrieben zugeführt werden.

<sup>1</sup>Lineares Mapping meint hier konkret, dass dem kleinsten/größten Wert des Hintergrundfeldes der 1er/99er-Perzentilwert des Tupels zugewiesen wird; dazwischen wird, konditioniert durch die Rasterwerte des Hintergrundfeldes, linear interpoliert.



**Abbildung 11.3.5:** Verwendete Methodik zur Ableitung einer sub-täglichen Niederschlagsklimatologie als Basis zur Festlegung von Schwellenwerten des Niederschlags für Bewertungsverfahren der Hochwasserreignung.

**Rückgangskonstante des ELS:** Das Einzellinearspeichermodell enthält lediglich einen Parameter, die Rückgangskonstante  $K$ . Technisch wird die Rückgangskonstante in einem, zu den anderen statischen Datensätzen konsistenten Raster vorgehalten. Die Voruntersuchungen (METZKES, 2016) erbrachten den Befund, dass – mit Blick auf der Gültigkeit des ScoHM-Ansatzes für kleine Einzugsgebiete – eine Rückgangskonstante von raum-zeitlich konstant  $K = 8,0$  h praktikabel ist.

### 11.3.4 Einbezogene Niederschlagsdaten (Bewegungsdaten: QPEs und QPFs)

Neben zeitlich invarianten Parameterfeldern müssen für den Betrieb des ScoHM-Ansatzes auch zeitlich veränderliche Felder einbezogen werden (siehe Abschnitt 11.3). Diese fachlichen Bewegungsdaten werden ebenfalls als Raster in KALYPSO verarbeitet („Zielraster“; siehe Abschnitt 11.3.5 und Abbildung 11.3.1). Es handelt sich um die folgenden Datensätze:

**Ombrometerdaten, gerastert (QPE):** Es werden stündliche Ombrometerwerte verwendet, welche via Webservice-Request direkt aus HWIMS abgerufen werden. Die Daten sind in der Regel in HWIMS spä-

testens innerhalb von 15 Minuten nach Ablauf einer vollen Stunde aktualisiert. Die Daten werden via inverser Distanzgewichtung (IDW) interpoliert und so gerastert. Es ergeben sich somit 24 Felder für dieses QPE pro Tag.

**Radardaten (QPE):** Es wird das RADOLAN-RW-Produkt<sup>1</sup> verwendet, also 60-Minuten-Summen bis einschließlich der 50. Minute einer Stunde. In der Regel stehen die Daten spätestens innerhalb von 15 Minuten nach Ablauf einer vollen Stunde auf den DWD-Servern zur Abholung bereit, von wo aus sie via FTP von KALYPSO abgeholt werden. Die Daten werden nicht über HWIMS, sondern direkt vom DWD bezogen.

**SNOW4 (QPE und QPF):** Der Output des DWD-Schneemodells SNOW4 stellt Rasterdaten des Wasserdargebots (also der Summe aus flüssigem Niederschlagsanteil plus Schmelzwasser<sup>2</sup>) für den

<sup>1</sup>Bzw. RADOLAN-RW-2, insofern auf den DWD-Servern vorhanden. Bei RADOLAN-2 handelt es sich um ein nachgeschaltetes, Nicht-Echtzeit-Verfahren auf Basis der RADOLAN-Methodik, welches auch nachgemeldete Niederschlagsdaten mit einbezieht, welche erst mit gewisser zeitlicher Verzögerung (einige Stunden bis wenige Tage) dem DWD verfügbar sind.

<sup>2</sup>Genauer: Summe aus flüssigem Niederschlag, welcher – insofern vorhanden – die Schneedecke verlässt plus Schmelzwasseranfall.

Simulations- („Vergangenheit“) sowie den Vorhersagezeitraum („Zukunft“) bereit. Die Aktualisierung erfolgt vier mal täglich zu den Vorhersagezeitpunkten 00, 06, 12 und 18 UTC. Der Vorhersagehorizont beträgt 72 Stunden. In der Regel stehen die Daten spätestens innerhalb von 2 Stunden nach Vorhersagezeitpunkt auf den DWD-Servern zur Abholung bereit, von wo aus sie via FTP von KALYPSO abgeholt werden. Die Daten werden nicht über HWIMS bezogen.

**COSMO-DE (QPF):** Der Output des NWP-Modells COSMO-DE wird für die Vorhersagezeitpunkte 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18 und 21 UTC bereitgestellt. Der Vorhersagehorizont beträgt aktuell 27 Stunden. In der Regel stehen die Daten spätestens innerhalb von 2 Stunden nach Vorhersagezeitpunkt auf den DWD-Servern zur Abholung bereit, von wo aus sie via FTP von KALYPSO abgeholt werden. Die Daten werden nicht über HWIMS bezogen.

**ICON-EU (QPF):** Der Output des NWP-Modells ICON-EU wird für die Vorhersagezeitpunkte 00, 06, 12 und 18 UTC bereitgestellt. Der Vorhersagehorizont beträgt aktuell 78 Stunden. In der Regel stehen die Daten spätestens innerhalb von 2 Stunden nach Vorhersagezeitpunkt auf den DWD-Servern zur Abholung bereit, von wo aus sie via FTP von KALYPSO abgeholt werden. Die Daten werden nicht über HWIMS bezogen.

**Quantilvorhersage (QPF):** Die Quantilvorhersagen werden von der DWD-RWB in Leipzig herausgegeben und via FTP an HWIMS übertragen, von wo aus sie via Webservice-Request an KALYPSO bereitgestellt werden. Das Produkt wird für die Vorhersagezeitpunkte 00 und 18 UTC erstellt und deckt einen Vorhersagehorizont von 36 Stunden ab. In der Regel stehen die Daten spätestens innerhalb von 1,5 Stunden nach Vorhersagezeitpunkt auf den DWD-Servern zur Abholung bereit.

### 11.3.5 Prozesse auf Ebene der KALYPSO-Rasterdatenbank

Um die Reaktionszeit beim Erstellen einer Frühwarnung für den Benutzer gering zu halten, sollen möglichst viele Daten in der Rasterdatenbank vorprozessiert bereit liegen (siehe Abbildung 11.3.1). Hierzu wird die Implementierung zusätzlicher Datenarten und Verarbeitungsvorschrif-

ten benötigt. Die Daten liegen in Rastern mit unterschiedlicher Zellgröße und in unterschiedlichen Koordinatensystemen/Projektionen vor. Die Verarbeitung erfolgt in einem gemeinsamen, sog. „Zielraster“. Zur weiteren Verwendung müssen Raster in der Rasterdatenbank eindeutig identifiziert sein. Dies geschieht in der Regel über ihre Daten-ID und – falls sie zeitabhängig sind – durch den Zeitpunkt bzw. das Intervall, welches sie repräsentieren. Eine Reihe von fachlichen und technischen Prozessen werden für die KALYPSO-Rasterdatenbank implementiert:

**Ermittlung der 30-d-Niederschlagssumme:** Für eine jede QPE/QPF-Kombination werden fortlaufend aktualisiert (mit stündlicher Aktualität) 30-d-Niederschlagssummen berechnet und als Raster in der Rasterdatenbank vorgehalten. Diese Raster sind spezifisch gemäß der zugrunde liegenden QPE/QPF-Kombination, dem Vorhersagezeitpunkt der einbezogenen QPFs sowie dem Vorhersagezeitpunkt der Frühwarnung. Die Anzahl der neuen Raster pro Tag ergibt sich aus der Anzahl einbezogener QPE/QPF-Kombinationen (avisiert: 12), der Anzahl an Vorhersagen pro Tag (avisiert für automatischen Betrieb: 4 bis 8) sowie der Anzahl an Stunden im Simulations- sowie dem Vorhersagezeitraum ( $24 + 24$ ) zu  $12 \cdot 4 \cdot (24 + 24) = 2.304$ . Die physikalische Einheit der Rasterwerte ist mm (pro Rasterzelle, Teilgebiet, Vorhersagegebiet).

#### Ermittlung des SPI für 30-d-Niederschlagssummen:

Die 30-d-Niederschlagssumme kann direkt in einen Wert für den 30-d-SPI umgerechnet werden. Dabei werden die für den aktuellen Tag des Jahres gültigen SPI-Parameter (siehe Abschnitt 11.3.3) verwendet:

$$SPI_{30d} = \text{ninv} \left( \gamma \left( P_{30d}, \rho_{\text{scale}}(t), \rho_{\text{shape}}(t) \right), \mu, \sigma \right) \quad (11.3.1)$$

mit  $SPI_{30d}(t)$  [–], dem SPI für 30-d-Niederschlagssummen  $P_{30d}(t)$  [ $L^3L^{-2}$ ], der unvollständigen Gammafunktion  $\gamma$  mit den raum-zeitlich variablen Lage- und Formparametern  $\rho_{\text{scale}}$  und  $\rho_{\text{shape}}$  [–] sowie der Inversen der Standardnormalverteilung (ninv mit den beiden Parametern Erwartungswert

$\mu = 0$  und Standardabweichung  $\sigma = 1$ ).<sup>1</sup> Kennzeichnung und Mengengerüst sind identisch wie bei den Rastern für die 30-d-Niederschlagssummen.

**Weitere Niederschlagssummen (7 d, 12/24/48 h):** Die Berechnung und die Kennzeichnung ist hier analog dem Vorgehen für die Ableitung der 30-d-Niederschlagssummen. Das Mengengerüst ändert sich dann entsprechend der Länge der betrachteten Zeitreihe.

**Berechnung des Ausflusses aus dem ELS:** Eine Besonderheit des verwendeten ScoHM-Modells (METZKES, 2016) ist die Einbeziehung eines Einzellinearspeichers (ELS) zur Retention von Stundenniederschlägen. Der fachliche Sinn dabei ist, ein durch kurzfristige, intensive Niederschläge hervorgerufenen hohes Niveau des Gesamtscores auch nach dem Niederschlagsereignis eine gewisse Zeit aufrechtzuerhalten. Für das Scoring wird daher als Teilscore der Ausfluss eines mit Stundenniederschlägen beaufschlagten ELS betrachtet. Speicherinhalt und -ausfluss werden für jedes Rasterelement für alle QPE/QPF-Kombinationen bestimmt. Der Inhalt eines ELS für ein bestimmtes Bilanzgebiet ist definiert zu (siehe z. B. DYCK, 1978):

$$V(t + \Delta t) = K \cdot P(t + \Delta t) \cdot A_E \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{K}}\right) + V(t) \cdot e^{-\frac{\Delta t}{K}} \quad (11.3.2)$$

mit dem Inhalt  $V$  [ $L^3$ ], der Speicherrückgangskonstante  $K$  [T] (alternativ Speicherkonstante oder Rückgangskonstante genannt), dem Zufluss zum Speicher  $P$  [ $L^3L^{-2}$ ] (hier der Niederschlag) sowie der Fläche des betrachteten Bilanzgebietes  $A_E$  [ $L^2$ ].

Der Ausfluss aus dem ELS  $Q_{ab}$  [ $L^3T^{-1}$ ] ergibt sich via Differentiation (Produktregel) von Gleichung 11.3.2 zu:

$$\begin{aligned} Q_{ab}(t + \Delta t) &= P(t + \Delta t) \cdot A_E \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{K}}\right) \\ &+ \frac{1}{K} \cdot V(t) \cdot e^{-\frac{\Delta t}{K}} \\ &= \frac{1}{K} \cdot V(t + \Delta t) \end{aligned} \quad (11.3.3)$$

<sup>1</sup>Die Berechnungsvorschrift (Gleichung 11.3.1) wurde hier bewusst in einer Funktionenform und nicht mathematisch abstrakt wiedergegeben um die Art der Umsetzung deutlich zu machen. Eine Funktion zur Bestimmung der Inversen der Standardnormalverteilung (hier: `ninv`) findet sich in allen höheren Programmiersprachen.

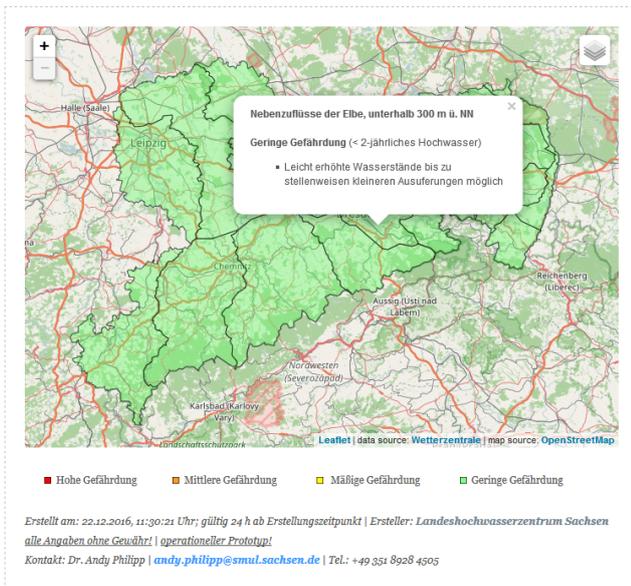
Gekennzeichnet sind die berechneten Raster durch die jeweils verwendete QPE/QPF-Kombination sowie den Vorhersagezeitpunkt der enthaltenen QPF. Es fallen für jeden Tag (24h) für 12 QPE/QPF-Kombinationen  $24 \cdot 12 = 288$  Rasterfelder an.

**Umrastern:** Um eine einheitliche Datenbasis zu erlangen, werden alle Rasterdaten auf ein Zielraster „umgerastert“. Das heißt, es wird ein Raster mit demselben Ausschnitt und derselben Zellgröße erstellt. Für dieses Zielraster werden die Zellgröße und das Koordinatensystem festgelegt (1 km mal 1 km; ETRS89/UTM Zone 33N; EPSG: 25833). Der Ausschnitt wird möglichst klein gewählt. Je nach weiterer Verwendung der Daten wird das Ergebnis gespeichert oder nach der Verwendung verworfen („on the fly“).

**Ombrometerdaten rastern:** Damit Ombrometermesswerte in den Gesamtprozess eingehen können, werden sie in die Fläche übertragen. Pro Zeitschritt (1 h) wird ein Raster erstellt. Die Daten werden über die Thiessen-Methode regionalisiert und Lücken in den Zeitreihen vorher gegebenenfalls per IDW (mit vier Nachbarn) gefüllt. Die Erstellung der Raster erfolgt mit einem gewissen Zeitversatz (1 bis 2 h), damit zum Zeitpunkt der Erstellung möglichst viele Messwerte in HWIMS zu Verfügung stehen.

**Import DWD-Quantilvorhersage:** Die Quantilvorhersage wird vom DWD als ASCII-Datei geliefert. Diese wird geparkt und die vorhergesagten Gebietsniederschläge den Geometrien der 16 für Sachsen für das Produkt definierten flussgebietsbezogenen Vorhersagegebiete zugewiesen (siehe Abbildung 6.1.1). Da drei Niederschlagsvorhersagen enthalten sind (10/50/90er-Perzentil) werden pro Stunden-Zeitschritt drei Raster erzeugt. Dazu werden die in der Quantilvorhersage enthaltenen 6-h- bzw. 12-h-Summen zeitlich gleichmäßig als Stundenwerte verteilt.

**Parameterraster und -abfrage:** Die für die fachlichen Berechnungen notwendigen Parameterraster (beispielsweise SPI-Parameter; siehe Abschnitt 11.3.3) werden bei einer etwaigen externen Änderung in einem ASCII-Grid-Format (ESRI-Format) der Rasterdatenbank angeboten (via Filesystem) und durch diese eingelesen und abgelegt. Für die Ermittlung von Scores wird eine spezielle Abfrage erstellt, die ein gegebenes Raster mit Perzentilrastern vergleicht und unter Verwendung



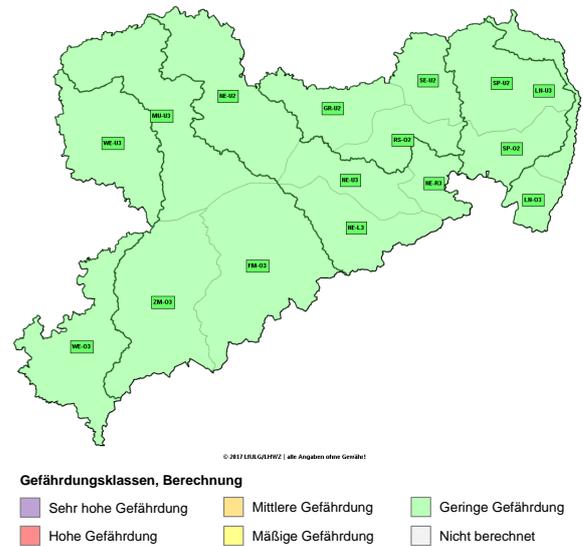
**Abbildung 11.3.6:** Mittels JavaScript-Bibliothek Leaflet visualisiertes GeoJSON aus präoperationellem Prototyp zur Hochwasserfrühwarnung. Vorhersagezeitpunkt: 22.12.2016, 06:00 UTC. Dargestellt sind hier 1 plus 3 Gefährdungsstufen (Stufe „sehr hohe Gefährdung“ in Stufe „hohe Gefährdung“ enthalten).

einer Bewertungsvorschrift (Klasseneinteilung; siehe Abschnitt 11.3.2) ein Ergebnisraster erzeugt.

**Zusätzliche Aggregierungsmethoden:** Zur Aggregierung von Rasterwerten anhand von Geometrien werden neben dem flächengewichteten Mittel zusätzliche Methoden (flächengewichtet) implementiert: Minimum, Maximum, Median, Quartile. Damit ist beispielsweise eine teilgebietspezifische Gangliniendarstellung dieser Indikatoren für den Gesamt- und die Teilscores möglich (siehe Abbildung 11.1.1, rechte Seite). Weiterhin wird die angepasste WARNSIM-Methodik implementiert (siehe Tabelle 11.3.2).

**Schlussfolgerung 35:** Die am LHWZ bestehende IT-Infrastruktur mit den Systemen HWIMS sowie KALYPSO bietet ein sehr günstiges Umfeld für eine zeit- und kosteneffiziente Erfüllung der an das Frühwarnsystem gestellten Anforderungen. Das betrifft Konzeption, Implementierung als auch den operationellen Betrieb sowie die Wartung und Pflege des IT-Systems KALYPSO-Frühwarnung. ❖

Hochwasserfrühwarnung für kleine Einzugsgebiete



**Abbildung 11.4.1:** Durch KALYPSO erstelltes Produkt zur Hochwasserfrühwarnung (Ampelkarte als Bilddatei; identische Geometrien wie in Abbildung 11.3.6). Vorhersagezeitpunkt: 22.12.2016, 06:00 UTC.

## 11.4 Diskussion

Es ist noch nicht abschließend geklärt, ob und wie sich eine „Hochwasserfrühwarnung“ vor dem Hintergrund der Hochwassernachrichten- und Alarmdienstverordnung (HWNAVO, 2015) sowie der Hochwassermeldeordnung (HWMO, 2015) darstellen soll. Die Erzeugung, Verteilung, Veröffentlichung und Kommunikation (i. S. v. begleitenden Informationen) von Produkten zur Hochwasserfrühwarnung (siehe Abschnitt 2.7) wird im Kern nicht durch KALYPSO erfüllt. Die Umsetzung der Perspektive zur Frühwarnung ermöglicht allerdings durch die implementierte Funktionalität eine dynamische Weiterverarbeitung von Frühwarninformationen (siehe Abschnitt 11.3.1), beispielsweise auf Basis des GeoJSON-Austauschformates. So ist unter anderem eine komfortable Darstellung von Modellergebnissen in einem Web-Kontext (Webseite) möglich (siehe Abbildung 11.3.6 sowie Kapitel 12.2). Unbenommen davon wird ein Frühwarnprodukt als Ampelkarte (siehe Abbildung 11.4.1) direkt von KALYPSO gerendert und als Bestandteil (Ergebnisdaten) des Frühwarn-Berichts in HWIMS abgelegt, steht dort also prinzipiell für die HWIMS-Methoden – wie die überwachte Verteilung von Informationen an Empfänger – zur Verfügung!

**Tabelle 11.4.1:** Gegenüberstellung der vorgestellten Hochwasserfrühwarnsysteme inklusive des neuen sächsischen Systems.

System/Produkt	Hydrologischer Bezug	Räumlicher Bezug	Vorhersagezeitraum (h)	Aktualisierungsintervall (h)	Grundlage	QPF-Antrieb
Hochwasserfrühwarnung Sachsen	Einzugsgebiete kleiner 200 km <sup>2</sup>	Einzugsgebiete	24	3 <sup>#</sup>	K	d, p
Hochwasserfrühwarnung Baden-Württemberg	Einzugsgebiete kleiner 200 km <sup>2</sup>	Landkreise	24 (48)	1 <sup>#</sup>	hM	d
Hochwasserfrühwarnung Hessen	Einzugsgebiete kleiner 200 km <sup>2</sup>	Landkreise	24	24 <sup>~</sup>	hM	d
Hochwasserfrühwarnung Rheinland-Pfalz	Einzugsgebiete kleiner 500 km <sup>2</sup>	Einzugsgebiete <sup>§</sup>	24	12 <sup>~</sup>	hM	p
EFAS-ERIC/ERICHA (EU JRC Ispra)	Einzugsgebiete größer 25 km <sup>2</sup>	Gerastert	72	24	hM	p
Warnung für kleine Gewässer Schweiz	Kleine und mittlere Gewässer	Einzugsgebiete	24	24	hM	p
Flash Flood Guidance	Einzugsgebiete	Gerastert	Variabel	Meist 24	hM <sup>+</sup>	d
Warndienst Binnenhochwasser Hamburg	Einzugsgebiete	Einzugsgebiete	24	3	K	d
HW-Frühwarnung Kachelmann GmbH	–	Gerastert	Reaktionszeit	5-minütig	N	–
DWD-Warnungen	–	Landkreise*	Variabel	Laufend	E	d, p

§ Bis 2016: Landkreise (LFU, 2016); \* seit Juli 2016 auch Gemeinden; # Differenz Bereitstellungszeit zu Vorhersagezeitpunkt ein bis zwei Stunden; ~ anlassbezogen kürzeres Aktualisierungsintervall; + hier wird die hydrologische Modellierung „vorab“, also nicht operationell durchgeführt; eigentlicher Modellinput im operationellen Betrieb: beobachtete/vorhergesagte Niederschläge; hM: deterministische hydrologische Modellierung; K: Klassifikationsansatz; N: lediglich Niederschlag wird verwendet; E: Experteneinschätzung auf Basis weitgehend automatisierter Guidance; d: deterministischer QPF-Antrieb; p: probabilistischer QPF-Antrieb.

Abschließend soll das neue sächsische Frühwarnsystem in den in Tabelle 11.4.1 dargestellten Reigen bisher bestehender operationeller Systeme eingeordnet werden (siehe Tabelle 11.4.1). Im Vergleich zu den am ehesten vergleichbaren Systemen der Länder Baden-Württemberg, Hessen sowie Rheinland-Pfalz gibt es starke Ähnlichkeiten bzw. Gemeinsamkeiten hinsichtlich des hydrologischen Bezugs von Warnprodukten (Einzugsgebiete kleiner 200 oder 500 km<sup>2</sup>), hinsichtlich des Vorhersagezeitraums (meist 24 h) sowie der öffentlich bereitgestellten Warnprodukte (Ampelkarten). Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass das sächsische System nicht auf „klassische“ deterministische hydrologische Modellierung setzt, um Prognosen abzuleiten, sondern dass hier ein klassifizierendes Bewertungsverfahren der Hochwasseranfälligkeit (siehe Abschnitt 8.1.3) zum Einsatz kommt.

## 12 Das Frühwarnsystem im Betrieb

In diesem Kapitel wird die Einbindung des in KALYPSO implementierten und operationalisierten IT-Systems zur Frühwarnung (siehe Kapitel 11) in den Systemkontext des LHWZ beschrieben. Weiterhin wird die letztendliche Aufbereitung von Frühwarninformationen zu tatsächlichen Warnprodukten sowie deren Veröffentlichung im Internet dargestellt. Zusätzlich wird für einen ersten Zeitraum des präoperationellen (seit 03/2016) und operationellen Betriebs (seit Ende 2016) des System verifiziert und interessante Einzelereignisse kurz beleuchtet. Schließlich wird die im Rahmen der Eröffnung der Web-Veröffentlichung von Frühwarnprodukten erfolgte Öffentlichkeitsarbeit geschildert.

### 12.1 Systemsetup für den operationellen Betrieb

Das in KALYPSO implementierte Frühwarnsystem selbst dient nicht der Veröffentlichung von Frühwarninformationen (vergleiche Abschnitt 11.4). Wie bereits im Abschnitt 11.2.3 beschrieben, soll als „Drehscheibe“ für Hochwasserfrühwarninformationen bzw. Warnprodukte das LHWZ-IT-System HWIMS (Hochwasserinformations- und -managementsystem) dienen. In Konsequenz wurde im Rahmen des hierin beschriebenen Projekts HWIMS angepasst, um schließlich Hochwasserfrühwarnungen via des öffentlichen LHWZ-Webportals (<http://www.hochwasserzentrum.sachsen.de>)<sup>1</sup> bereitstellen zu können. Diese Lösung trennt die fachliche Erstellung einer Frühwarnung von der Veröffentlichung von Frühwarnprodukten und ist auch insofern konsequent, dass günstige Eigenschaften von HWIMS (revisionssichere Ablage von Dokumenten, aktive Verteilung von Dokumenten an beliebige Empfänger über verschiedene Kanäle, hohe Verfügbarkeit des IT-Systems HWIMS etc.) synergetisch wirksam werden. Wie bereits erwähnt ist aber zu-

nächst nicht vorgesehen, Frühwarnungen im Sinne der Hochwassernachrichten- und Alarmdienstverordnung (HWNAVO, 2015) sowie der Hochwassermeldeordnung (HWMO, 2015) an die sog. Informationsempfänger aktiv zu verteilen („Bringepflicht“ des LHWZ), sondern lediglich passiv via Internet zur Abholung durch die Nutzer bereitzustellen.

Die Belieferung der HWIMS-Webportal-Anwendung mit Frühwarninformationen erfolgt aus KALYPSO heraus mittels eines Webservices<sup>2</sup> (siehe Abbildung 12.1.1), ein Procedere, welches übrigens auch dem Austausch von pegelbezogenen Vorhersagen aus KALYPSO mit HWIMS dient. Die Übergabe der Frühwarnungen an HWIMS erfolgt als „HWIMS-Dokument“ (siehe HWIMS-Datenverarbeitungskonzept; T-MMS, 2015). Der Austausch wird dabei entweder manuell durch einen KALYPSO-Nutzer („per Knopfdruck“), oder aber automatisch – entsprechend des für die Frühwarnung gesetzten Update-Zyklus – mittels Cron-Jobs<sup>3</sup> getriggert. Die HWIMS-Dokumentenverwaltung überführt dann das Dokument „Frühwarnung“ in eine Langzeitdatenbank, wo es revisionssicher abgelegt wird.

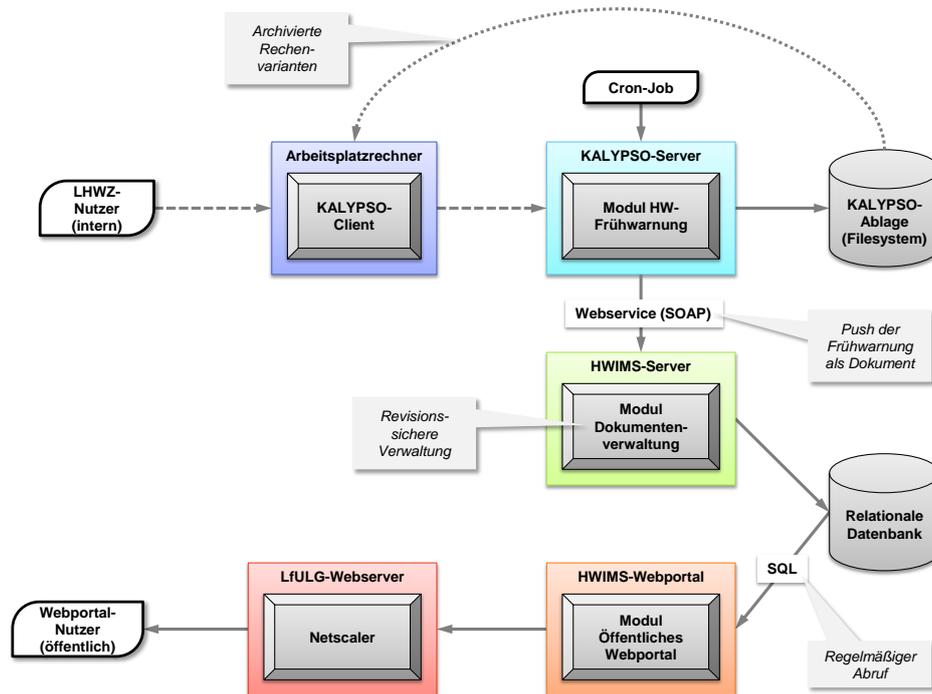
Die durch KALYPSO dynamisch via Webservice bereitgestellten Daten verwenden ein typisiertes Austauschformat auf XML/GeoJSON-Basis und enthalten dabei:

- ▶ Globale Metadaten
  - Vorhersagezeitpunkt
  - Erstellungszeitpunkt der Frühwarnung
  - Verfallszeitpunkt (Vorhersagezeitpunkt und Vorhersagezeitraum)
  - Ersteller der Frühwarnung („KALYPSO“)

<sup>1</sup>Eventuell wird bezüglich des Einstiegs auf die Seiten zur Hochwasserfrühwarnung eine Kurzdomain wie [fruehwarnung.sachsen.de](http://fruehwarnung.sachsen.de) eingerichtet.

<sup>2</sup>Wikipedia: <https://de.wikipedia.org/wiki/Webservice> (abgerufen am 07.04.2017): „Ein Webservice (auch Webdienst) ermöglicht die Maschine-zu-Maschine-Kommunikation auf Basis von HTTP oder HTTPS über Rechnernetze wie das Internet. Dabei werden Daten ausgetauscht und auf entfernten Computern Funktionen aufgerufen.“

<sup>3</sup>Wikipedia: <https://de.wikipedia.org/wiki/Cron> (abgerufen am 07.04.2017): „Der Cron-Daemon dient der zeitbasierten Ausführung von Prozessen (...), um wiederkehrende Aufgaben zu automatisieren.“



**Abbildung 12.1.1:** Kontextsicht KALYPSO und HWIMS; KALYPSO erzeugt die Frühwarninformationen und HWIMS ist für deren Verwaltung und Veröffentlichung zuständig. Dargestellt ist hier nur der Datenfluss von in KALYPSO erstellten Frühwarnungen. Für das KALYPSO-Verfahren sind unter anderem Antriebsdaten notwendig, welche wiederum durch HWIMS bereitgestellt werden (vergleiche Abbildung 11.3.1), wobei die Kommunikation dabei wiederum über eine Webservice-Schnittstelle läuft.

- Gefährdungsklassen (Liste)
  - ID der Gefährdungsklassen
  - RGB-Code (also Farbcode für „grün“, „gelb“ etc.)
  - textuelle Repräsentation („geringe Gefährdung“ etc.)
- Vorhersagegebiete (Liste)
  - ID der Vorhersagegebiete
  - Name (beispielsweise „Freiberger Mulde oberhalb 300 m ü. NN“)
  - Kurzname (beispielsweise „FM-O3“)
  - Warnlagengefährdungsklasse für jede ID (die eigentliche „Warnstufe“)
  - Kurzbericht für jedes Vorhersagegebiet (ist in KALYPSO erstellbar; siehe Punkt 5. unter Abschnitt 11.3.1)
  - Umringpolygon (die Geometrien der Vorhersagegebiete)

Standardmäßig wird aktuell die automatische Rechenvariante mit der QPE/QPF-Kombination RADOLAN/COSMO-DE gegen HWIMS publiziert; eine Änderung dieser Wahl ist jederzeit konfigurativ möglich. Die eigentliche Produktion der Frühwarnung erfolgt dann durch das HWIMS-Webportal-Modul, welches aus den genannten dynamischen Informationen sowie statischen Inhalten die Frühwarnseiten auf das öffentliche Webportal publiziert, von wo aus sie ausgeliefert werden. Die statischen Inhalte werden dabei aus dem LfULG-Content-Management-System zCMS eingespeist und sind dort für das LHWZ redaktionierbar. Die Präsentation der Frühwarnung im Internet wird im folgenden Abschnitt 12.2 besprochen.

**Schlussfolgerung 36:** *Das konzeptionelle und technische Einpassen des Frühwarnsystems in den Systemkontext des LHWZ bietet die Voraussetzung für ein umfassendes und flexibles Management von Frühwarninformationen, inklusive ihrer Veröffentlichung.* ❖

## 12.2 Präsentation von Frühwarninformationen im Internet

Wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, erfolgt die eigentliche Erstellung von Frühwarnprodukten durch das HWIMS-Webportal. Das Webportal liefert dabei für die Hochwasserfrühwarnung spezifische Inhalte in zwei Ausprägungen aus: erstens als Standard-Webseite sowie zweitens in einer für mobile Endgeräte optimierten Ansicht. Im Rahmen der Standard-Webseite des Landeshochwasserzentrums (<http://www.hochwasserzentrum.sachsen.de>) wird ein neuer Navigationspunkt „Frühwarnung“ ergänzt, über den die Frühwarn-Hauptseite zugänglich ist. Die Hauptseite enthält dabei die folgenden Elemente (Abbildung 12.2.1):

1. **Navigation:** Die Navigation wird um den Punkt „Hochwasserfrühwarnung“ ergänzt, und zwar zwischen den bestehenden Knoten „Hochwasserwarnungen“ und „Download von Messwerten“.
2. **Ampelkarte:** Hier wird aus den typisierten Ergebnisdaten des Frühwarn-Fachverfahrens eine Ampelkarte erstellt. Gebietszuschnitte, Anzahl von Gefährdungsklassen, RGB-Code der Gefährdungsklassen, textuelle Beschreibung ebendieser etc. sind dynamische Daten, was entsprechend bei der Erstellung der Ampelkarte berücksichtigt wird. Somit ist eine hohe Flexibilität gegeben und etwaige methodische Anpassungen im Fachverfahren erfordern keine Änderung an der Herstellungsweise der Ampelkarte.
3. **Kurzbericht:** Hier wird der in den Ergebnisdaten enthaltene Text des Kurzberichts/der Kurzberichte (dynamisch) dargestellt.
4. **Textuelle Informationen:** Text und Inhalte, welche aus dem LfULG-CMS gespeist werden und eher statischen Charakter tragen (obschon via CMS editierbar!). Es finden sich Informationen zu den Punkten:
  - Motivation für ein Frühwarnprodukt („Warum Hochwasserfrühwarnung?“)
  - Kurze, allgemeinverständliche Beschreibung des Verfahrens („Das Frühwarnsystem“)
  - Verbale Beschreibung der Gefährdungsklassen (wiederum dynamisch generiert, da administrier-

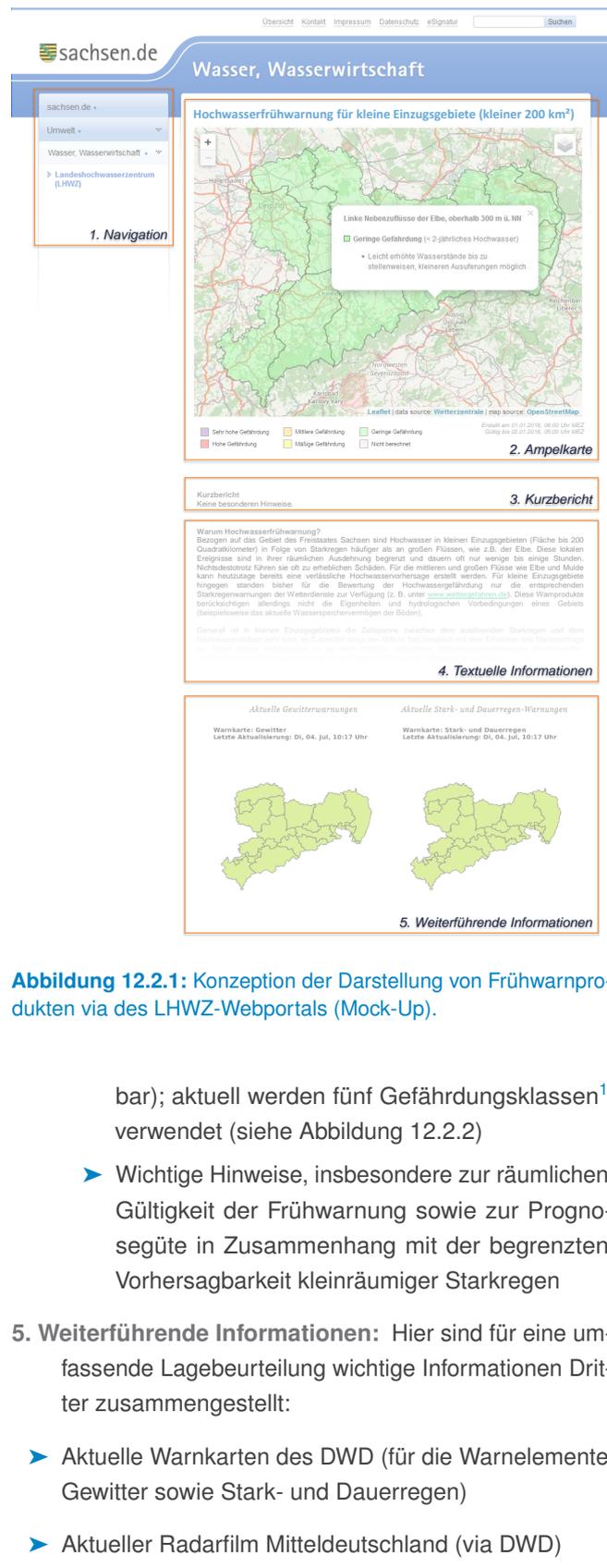


Abbildung 12.2.1: Konzeption der Darstellung von Frühwarnprodukten via des LHWZ-Webportals (Mock-Up).

bar); aktuell werden fünf Gefährdungsklassen<sup>1</sup> verwendet (siehe Abbildung 12.2.2)

- Wichtige Hinweise, insbesondere zur räumlichen Gültigkeit der Frühwarnung sowie zur Prognosegüte in Zusammenhang mit der begrenzten Vorhersagbarkeit kleinräumiger Starkregen

5. **Weiterführende Informationen:** Hier sind für eine umfassende Lagebeurteilung wichtige Informationen Dritter zusammengestellt:

- Aktuelle Warnkarten des DWD (für die Warnelemente Gewitter sowie Stark- und Dauerregen)
- Aktueller Radarfilm Mitteldeutschland (via DWD)

<sup>1</sup>Hierbei wird sich stark an der in Rheinland-Pfalz verwendeten Systematik orientiert (siehe <http://fruehwarnung.hochwasser-rlp.de/warnklassen.html>).

–	<b>Sehr hohe Gefährdung</b>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Überflutung bebauter Gebiete in größerem Umfang</li> <li>· Einsatz der Wasserwehr in größerem Umfang erforderlich</li> </ul>
–	<b>Hohe Gefährdung</b>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Überflutung bebauter Grundstücke oder Keller</li> <li>· Sperrung überörtlicher Verkehrsverbindungen</li> <li>· Vereinzelter Einsatz der Wasserwehr erforderlich</li> </ul>
–	<b>Mittlere Gefährdung</b>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Überflutung einzelner bebauter Grundstücke oder Keller</li> <li>· Verkehrsbehinderungen auf Hauptverkehrs- und Gemeindestraßen</li> </ul>
–	<b>Mäßige Gefährdung</b>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Stellenweise Ausuferungen möglich</li> <li>· Vereinzelte Überflutung land- und forstwirtschaftlicher Flächen möglich</li> <li>· Vereinzelte Überflutung bebauter Grundstücke oder Keller möglich</li> <li>· Vereinzelte Verkehrsbehinderungen möglich</li> </ul>
–	<b>Geringe Gefährdung</b>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Leicht erhöhte Wasserstände bis zu stellenweisen, kleineren Ausuferungen möglich</li> </ul>
.....	
–	<b>Keine Informationen</b>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Aus technischen Gründen stehen derzeit leider keine Informationen zur Verfügung</li> </ul>

**Abbildung 12.2.2:** Übersicht der aktuell verwendeten fünf Gefährdungsklassen und ihrer Bedeutung (plus Klasse „keine Informationen“).

- Aktuelle Lage an den Hochwassermeldepegeln (beispielsweise via LHP)

Aus Gründen der Übersichtlichkeit beschränkt sich das mobile Webportal auf die Darstellung von Ampelkarte und Legende. Ein kleines, aber sicher nicht uninteressantes Detail der gewählten Lösung ist die Möglichkeit der Publikation von Frühwarninformationen via RSS-Feed,<sup>1</sup> welche nur angeboten werden, wenn eine nichttriviale Warninformation (Gefährdungsklasse > kleinste Gefährdungsklasse) vorliegt. Auf diesem Wege ist es durchaus möglich, über ent-

<sup>1</sup>Steht für Really Simple Syndication und stellt eine Technologie zum Abonnieren von Webinhalten dar.

sprechende webbasierte Dienste oder Smartphone-Apps automatische Push-Benachrichtigungen für ein bestimmtes Vorhersagegebiet zu generieren; die Feeds werden spezifisch für die einzelnen Vorhersagegebiete (IDs) angeboten.

## 12.3 Verifikation des Prototyps für das erste Jahr des präoperationellen Betriebs

Zur Vorbereitung und Begleitung der Konzeption und Implementierung des operationellen Hochwasserfrühwarnsystems (siehe Kapitel 11) wurde ein präoperationeller Prototyp auf Basis der ScoHM-Methodik nach METZKES (2016) implementiert (siehe Abschnitt 8.1.3) und seit März 2016 betrieben. Der normale Update-Zyklus betrug dabei zunächst 24 Stunden; ereignisbezogen wurden aber manuell häufigere Updates (bis 3 Stunden) getriggert. Als QPE wurden IDW-interpolierte Stationsdaten und das RADOLAN-RW-Produkt verwendet, auf QPF-Seite kam das nicht-hydrostatische WRF-Modell<sup>2</sup> der Wetterzentrale Karlsruhe (<http://www.wetterzentrale.de>) zum Einsatz. Der Vorhersagezeitraum betrug 24 Stunden. Der wesentliche Unterschied des Prototyps zur finalen Konzeptversion besteht in der Wahl von lediglich eins plus drei (statt eins plus vier) Gefährdungsstufen. Die räumliche Auflösung des Prototyps beträgt ein mal ein Kilometer.

Zur Verifikation wurden die in Abschnitt 2.4.1 vorgestellten dichotomen Maße berechnet. Zur Festlegung eines beobachteten Ereignisses wurden mit Bezug zu den gewählten 16 Vorhersagegebieten (vergleiche Abbildung 6.1.1 und Tabelle 6.1.1) zum einen die beobachteten Wasserstände an den Hochwassermeldepegeln bewertet (klassifiziert entsprechend der Richtwerte der Alarmstufen). Zum anderen – denn nicht zwangsläufig prägen sich kleinräumige Abflussereignisse auf Pegelmessungen durch – wurden von den Feuerwehrleitstellen Einsatztagebücher angefordert, welche Rückschlüsse auf kleinräumige Abflussereignisse zuließen. Auf Basis dieser Informationen wurden beobachtete Ereignisse den Gefährdungsstufen 0 bis 3 zugeordnet, wobei im Untersuchungszeitraum lediglich die Stufen 0 bis 2 auftraten. Die vorhergesagten Ereignisse wurden bezüglich der Vorhersagegebiete mit einer – gegenüber den für das operationelle System angepas-

<sup>2</sup>Steht für „Weather Research and Forecasting Model“.

**Tabelle 12.3.1:** Kontingenztabelle für die dichotome Bewertung des Outputs des präoperationellen Prototyps für den Zeitraum 03.03.2016 bis 02.03.2017. Die Gesamtzahl der Tage beträgt 364, da für einen Tag keine Daten vorhanden waren (Systemausfall).

		Beobachtung	
		Ja	Nein
Ereignis vorhergesagt	Ja	10	2
	Nein	2	350
Summe		12	352

**Tabelle 12.3.2:** Gütemaße (siehe Abschnitt 2.4.1) für die Verifikation des präoperationellen Prototyps für den Zeitraum 03.03.2016 bis 02.03.2017.

Maß	Wert	Bemerkung
TPR	0,83	Trefferquote
FPR	0,01	Fehlalarmquote
CSI	0,71	Critical Success Index
ETS	0,71	CSI korrigiert um Zufallsvorhersagen

ten WARNSIM-Regeln (vergleiche Tabelle 11.3.2) – stark vereinfachten Methodik ermittelt. Die auf Rasterbasis ermittelten Gefährdungen wurden gemäß ihres 50er-Perzentils zu Gebietsaussagen aggregiert.

Die eigentliche, dichotome Bewertung soll zusammenschauend für ganz Sachsen erfolgen; betrachtet werden Ereignismagnitude und Lokalisierung hinsichtlich der Vorhersagegebiete. Es ergeben sich die in Tabelle 12.3.1 dargestellten Werte, welche die Grundlage bilden für die in Tabelle 12.3.2 zusammengefassten Verifikationsergebnisse. Generell ist zu beachten, dass der Untersuchungszeitraum zu kurz ist, um statistisch belastbare Aussagen treffen zu können. Ursache dafür ist, dass lediglich 14 nicht-triviale Ereignisse in die Verifikation Eingang finden. Sieht man von diesen Unsicherheiten einmal ab, so kann der im Rahmen der Pilotstudie zur hydrologischen Modellierung (Kapitel 8) gewonnene Eindruck bestätigt werden, dass das ScoHM-Verfahren einen guten prädiktiven Nutzen für den Anwendungsfall der Hochwasserfrühwarnung zu liefern imstande ist. Bei den beiden „Misses“ handelte es sich um sehr kleinräumige Ereignisse, welche mit der quantitativen Niederschlagsvorhersage nicht adäquat abgebildet wurden.

**Schlussfolgerung 37:** Die Verifikation des operationellen Prototyps für das erste Betriebsjahr bestätigt das bereits im Rahmen der Vorstudien gewonnene Bild, dass einfache, klassifizierende Bewertungsverfahren zur Abschätzung der Hochwasserneigung für die Hochwasserfrühwarnung gut geeignet sind. ❖

## 12.4 Fallstudien, Einzelereignisse

In diesem Abschnitt werden für einen ersten Zeitraum des präoperationellen (03/2016 bis 09/2017) und operationellen Betriebs (seit Ende 2016) interessante, ausgewählte Einzelereignisse kurz (in chronologischer Reihenfolge) beleuchtet und der potentiell durch das Frühwarnsystem zu erzielende Benefit dargestellt (siehe Tabelle 12.4.1). Gleichsam sollen die folgenden Darstellungen abermals den Charakter und damit die Grenzen der Vorhersagbarkeit kleinräumiger Starkregenerereignisse und ihrer Auswirkungen aufzeigen.

### Mai/Juni 2016 – Starkregen in Sachsen

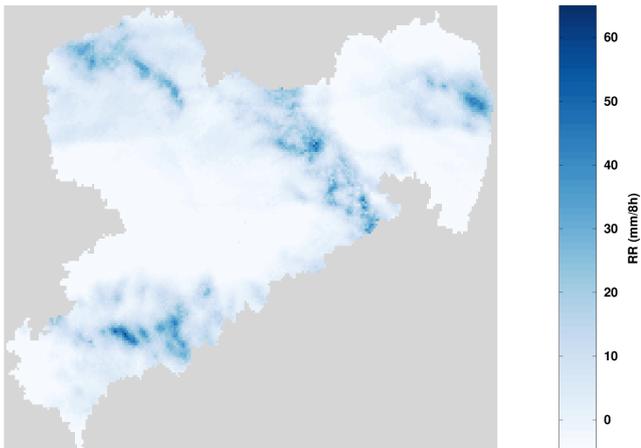
Im Mai 2016 waren weite Teile Deutschlands und Sachsens außergewöhnlich lange durch die Großwetterlage Tief Mitteleuropa beeinflusst. Eine relativ gradientenarme synoptische Situation (Blocking durch starkes fennoskandisches Hoch) führte zu wenig dynamischem Antrieb in der Höhe (persistentes Höhentief); stark labilisierte, gesättigte Luftmassen strömten über fast zwei Wochen aus Südosten nach Mitteleuropa/Deutschland ein und es kam entlang einer sich immer wieder regenerierenden Tiefdruckrinne zu betonter Konvektion in Folge von Konvergenz. Besonders die Bodentiefs *Elvira* und *Fredericke* dürften in Erinnerung bleiben, spielten sich doch in ihrem Fahrwasser die Ereignisse in Braunsbach (30.05.) und Simbach (01./02.06.) ab. Die Lage dauerte vom 26.05. bis zum 05.06. an und änderte sich erst ab dem 06.06. mit dem Zustrom trockener Luft aus Nordosten.

In besagtem Zeitraum war Sachsen, neben Mecklenburg-Vorpommern und Brandenburg, das einzige Bundesland ohne Überschreitungen von Alarmstufen-Richtwerten an den Meldepegeln. Es kam aber zu lokalen Überflutungen/Überschwemmungen in Demitz-Thumitz (23./24.05.), Aue und Chemnitz (28.05.), Sächsische Schweiz und Fischbach (31.05.) sowie Leipzig-Südvorstadt (01.06.).

Tabelle 12.4.1: Übersicht der vorgestellten Einzelereignisse.

Nummer	Zeitraum	Lokalisierung	Ereignisart	Niederschlagsintensität <sup>§</sup>	Prognosegüte	Güte Hindcast <sup>#</sup>	Befund der Prognose
1	31.05.2016	Sächsische Schweiz	Konvektiv	> 30 mm · 20 min <sup>-1</sup>	✗	-	Falsch negativ
2	31.07.2016	Westsachsen	Konvektiv	> 50 mm · 3 h <sup>-1</sup>	✓	-	Richtig positiv
3	28.12.2016	Röder/Schwarze Elster	Zyklonal	> 40 mm · 6 h <sup>-1</sup>	✓	-	Richtig positiv
4	Feb. 2017	Sachsen	Schneeschmelze	> 30 mm · 24 h <sup>-1</sup>	✓	-	Richtig positiv
5	14.05.2017*	Oberlausitz	Konvektiv	> 30 mm · 20 min <sup>-1</sup>	✓	-	Richtig positiv
6	28./29.06.2017	Ost- und Westsachsen	Zyklonal-konvektiv	> 50 mm · 6 h <sup>-1</sup>	✓	✓	Richtig positiv
7	10.07.2017	Nordsachsen	Zyklonal-konvektiv	> 70 mm · 24 h <sup>-1</sup>	✓	✓	Richtig positiv
8	11.07.2017	Oberlausitz	Zyklonal-konvektiv	> 40 mm · 6 h <sup>-1</sup>	✗	✓	Falsch negativ
9	12.07.2017	Verbreitet	Zyklonal	> 35 mm · 6 h <sup>-1</sup>	✓	✗	Richtig positiv
10	26./27.07.2017	Ostsachsen	Zyklonal	> 30 mm · 6 h <sup>-1</sup>	✗	✗	Falsch positiv
11	01./02.08.2017	Ostsachsen	Konvektiv	> 35 mm · 6 h <sup>-1</sup>	✓	✓	Richtig positiv
12	10./11.08.2017	Ost-, West- und Nordsachsen	Zyklonal-konvektiv	> 40 mm · 60 min <sup>-1</sup>	✓	✓	Richtig positiv

<sup>§</sup>Maximale lokale Intensitäten aus DWD-RADOLAN-RW; \* bedeutsames Ereignis gemäß Tabelle 3.1.1; <sup>#</sup>Hindcasts sind im Frühwarnsystem seit 06/2017 verfügbar.



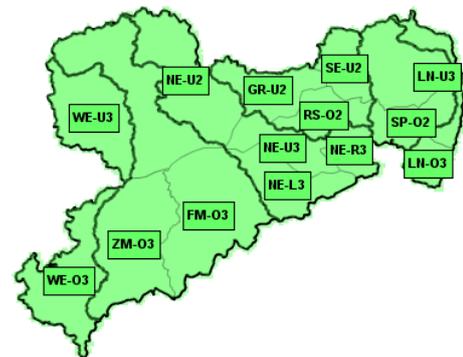
**Abbildung 12.4.1:** Aus RADOLAN-RW gebildete 8-h-Summe bis 31.05.2016, 20:50 Uhr MESZ.

Exemplarisch sei hier jenes Einzelereignis genannt, welches am 31.05. mit hohen lokalen Intensitäten (mehr als 30 mm in 20 min) beispielsweise zum Abgang von Schlammlawinen in der Sächsischen Schweiz geführt hat und so zeitweise den Bahnverkehr zwischen Schöna und Bad Schandau lahmlegte. Lokale Beeinträchtigungen gab es aber auch anderswo an diesem 31. Mai, beispielsweise in Fischbach, wo das kleine Döringsbornwasser ausuferte und mehrere Grundstücke überschwemmt wurden. Abbildung 12.4.1 zeigt die Niederschlagsverteilung eines Achtstundenzeitraums an diesem Tag.

Die standardmäßig im Frühwarnsystem verwendete COSMO-DE-QPF hatte zwar deutliche Signale zur Konvektion am 31.05.2016 anzubieten, diese fielen allerdings – insbesondere bezüglich des 06:00-UTC-Laufs – zu moderat aus, um ein signifikantes Signal in der Frühwarn-Ampelkarte zu produzieren (Abbildung 12.4.2). Hieran zeigt sich einmal mehr die große Schwierigkeit, mit NWP-Methoden konvektive Entwicklungen realistisch zu prognostizieren. Nichtsdestotrotz war die Entwicklung durch die DWD-Vorhersagemeteorologen frühzeitig und hinsichtlich der dann aufgetretenen Mengen richtig eingeschätzt worden (siehe Abbildung 12.4.3).

### 31.07.2016 – Starkregen in Westsachsen

Am Sonntag, den 31.07.2016, lag Sachsen an der Südflanke eines Tiefdruckkomplexes über Nordeuropa; es herrschte entsprechend unbeständiges Wetter mit Gewittertätigkeit. Am Nachmittag gab es vor allem in Westsachsen mehrere intensive Einzelereignisse (siehe Abbildung 12.4.4). Beson-



**Gefährdungsklassen, Berechnung**  
 Sehr hohe Gefährdung (lila)    Mittlere Gefährdung (orange)    Geringe Gefährdung (hellgrün)  
 Hohe Gefährdung (rot)    Mäßige Gefährdung (gelb)    Nicht berechnet (weiß)

**Abbildung 12.4.2:** Frühwarn-Ampelkarte (Prognose); Vorhersagezeitpunkt: 31.05.2016, 12:00 Uhr MESZ, QPE: RADOLAN-RW, QPF: COSMO-DE (06:00-UTC-Lauf).

```

WARNLAGEBERICHT für
Sachsen

ausgegeben vom Deutschen Wetterdienst
am Dienstag, 31.05.2016, 10:30 Uhr

Ab heute Nachmittag bis morgen gebietsweise starke Gewitter und
örtlich UNWETTER möglich.

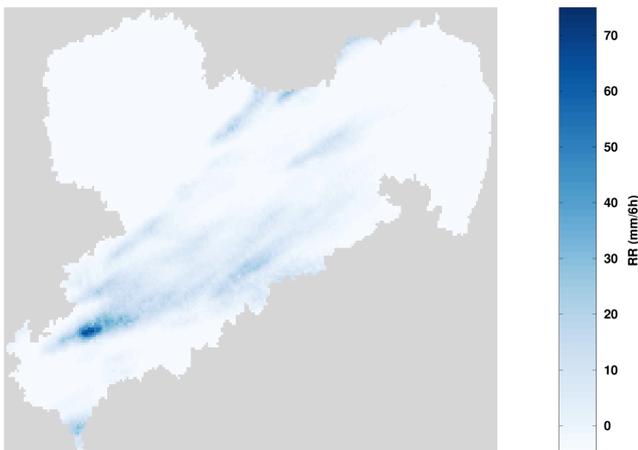
Entwicklung der Wetter- und Warnlage für die nächsten 24 Stunden bis
Mittwoch, 01.06.2016, 10:30 Uhr:

An der Nordflanke eines zonal ausgeprägten Tiefdruckkomplexes über
Mittel- und Osteuropa gelangt weiterhin feucht-warme und labile Luft
nach Sachsen.

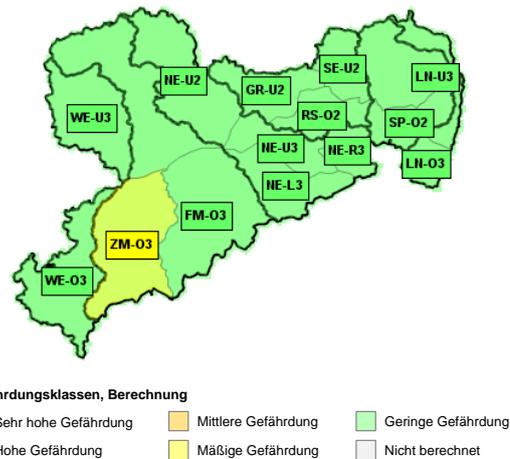
In der zweiten Tageshälfte werden zunächst vorrangig in Ost- und
Mittelsachsen, sowie im Mittelgebirge starke Gewitter erwartet. Dann
muss örtlich wieder mit Starkregen bis 25 l/m² innerhalb kurzer Zeit,
stürmischen Böen um 70 km/h (Bft 8) und feinkörnigem Hagel gerechnet
werden. Vereinzelt sind unwetterartige Entwicklungen bezüglich
heftigen Starkregens mit Mengen um 30 l/m² in einer Stunde und
größeren Hagels möglich. Zum Abend und in der kommenden Nacht
verlagern sich die starken, teils auch schweren Gewitter auch nach
Westsachsen. Zudem kann im Nachtverlauf abseits von Gewittern auch
Starkregen bis 35 l/qm in 6 Stunden auftreten. Am Mittwoch werden
erneut stellenweise starke, teils schwere Gewitter mit Starkregen,
Hagel und Stürmböen erwartet. UNWETTER durch heftigen Starkregen und
Hagel sind örtlich erneut möglich!

Nächste Aktualisierung: spätestens Dienstag, 31.05.2016, 14:30 Uhr
Deutscher Wetterdienst, RWB Leipzig, Manuel Voigt
    
```

**Abbildung 12.4.3:** DWD-Warnlagebericht Sachsen für Dienstag, 31.05.2016, 10:30 Uhr MESZ.



**Abbildung 12.4.4:** Aus RADOLAN-RW gebildete 6-h-Summe bis 31.07.2016, 17:50 Uhr MESZ.



**Abbildung 12.4.6:** Frühwarn-Ampelkarte (Prognose); Vorhersagezeitpunkt: 31.07.2016, 12:00 Uhr MESZ, QPE: RADOLAN-RW, QPF: COSMO-DE (06:00-UTC-Lauf).

**Heftige Gewitter: Überflutete Straßen, Keller unter Wasser - allein 40 Einsätze in Zwickau**  
 erschienen am 31.07.2016

Zwickau. Starke Gewitter haben am Sonntag in Teilen der Region ihre Spuren hinterlassen. Vor allem rund um Zwickau und im Vogtland bildeten sich immer wieder kräftige Zellen. Die Folge waren vollgelaufene Keller und überschwemmte Straßen. In Zwickau waren die Stadtteile Pölbitz, Mitte und Marienthal besonders betroffen. Insgesamt kam es laut Rettungsleitstelle zu 40 Einsätzen.

Zwischen Lengenfeld und Irfersgrün, am Abzweig nach Pechtelsgrün und Waldkirchen, setzte Starkregen die S293 unter Wasser. Dort rückte die Feuerwehr Waldkirchen mit sechs Kameraden an, um das Wasser abzupumpen. Auch in Lengenfeld musste die Feuerwehr ausrücken und vollgelaufene Keller auspumpen.

In Weißbach bei Zwickau trat der Dorfbach über die Ufer und überschwemmte 200 Meter Straße. Die Feuerwehr holte ein Gitter aus dem Bach, weil sich Treibgut verfang. An der Katholikowitz-Straße in Kirchberg stand das Wasser im Keller eines Wohnblocks. (mar/nikm)

Die S293 unter Wasser.  
 Foto: André März

In Weißbach musste der Dorfbach von Treibgut befreit werden.  
 Foto: Niko Mutschmann

**Abbildung 12.4.5:** Freie Presse Online abgerufen am 31.07.2016; (c) Chemnitzer Verlag und Druck GmbH und Co. KG.

ders waren die Gegend um Kirchberg, Lengenfeld sowie der Norden Zwickaus betroffen. Straßen wurden überflutet, Keller standen unter Wasser und es traten punktuelle Überschwemmungen auf (beispielsweise in Weißbach). Abbildung 12.4.5 zeigt als Beleg einen Ausriss aus den Medien mit einem Bericht über die Unwetter.

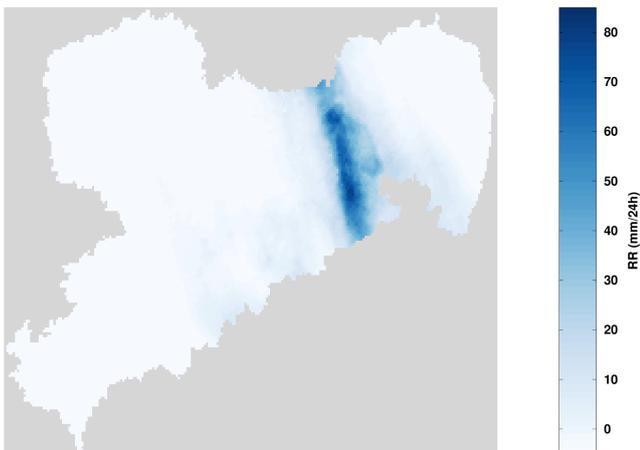
In den meisten QPFs waren größere Niederschlags-höhen prognostiziert, teilweise bis in den unwetterartigen Bereich hinein. Ein recht deutliches Signal im 06:00-UTC-Lauf von COSMO-DE führte dann letztlich zu einer Ge-

fährdungsabschätzung der Stufe „mäßig“ für das Vorhersagegebiet ZM-O3 (Zwickauer Mulde oberhalb 300 m ü. NN; siehe Abbildung 12.4.6), was gut zu den am Nachmittag beobachteten Auswirkungen der Niederschläge im Westen von ZM-O3 passt. Allerdings waren der Bereich maximaler zu erwartender Niederschlagstätigkeit in der NWP etwas stärker südöstlich verortet. Hier zeigt sich der Sinn der Generalisierung von punktuell gewonnenen Gefährdungsabschätzungen zu einer regional gültigen Aussage.

### 28.12.2016 – Regionales Hochwasser im Rödergebiet

In der Nacht vom 27.12. zum 28.12.2016 sowie im Tagesverlauf des 28. kam es in einem schmalen Streifen des Freistaats an einer Luftmassengrenze zu ergiebigen Niederschlägen, mit Mengen regional jenseits von 50 mm in 24 h (40 mm in 6 h; siehe Abbildung 12.4.7). Die hochaufgelösten NWP-Systeme wie COSMO-DE konnten die grundsätzliche synoptische Situation sowie die regionale Ausprägung der Niederschläge hinsichtlich Menge und Verortung gut abbilden; bereits der 00:00-UTC-Lauf von COSMO-DE vom 28.12. hatte die hohen Niederschläge im Bereich der Flussgebiete Große Röder und Schwarze Elster sowie den (rechten) Nebenflüssen der Oberen Elbe gut prognostiziert.

Getrieben durch COSMO-DE als QPF, gelang mittels des Frühwarnsystems eine gute Abschätzung der Gefährdungslage (Abbildung 12.4.8). Betrachtet man die



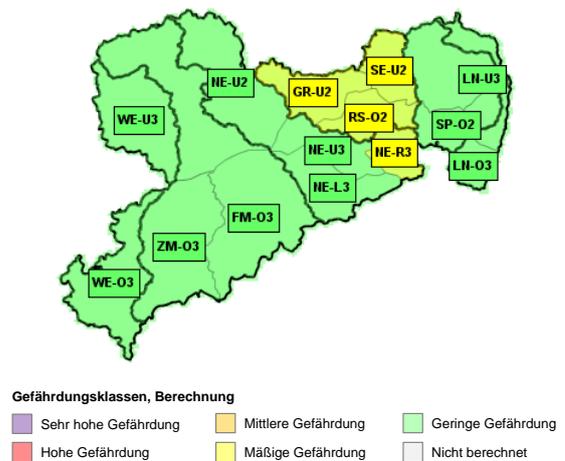
**Abbildung 12.4.7:** Aus RADOLAN-RW gebildete 24-h-Summe bis 28.12.2016, 17:50 Uhr MEZ.

dann tatsächlich ab dem Abend des 28.12. sowie am 29.12.2016 aufgetretenen maximale Wasserführung (Abbildung 12.4.9), so wird deutlich, dass lediglich für das Vorhersagegebiet NE-R3 (rechte Nebenflüsse der Elbe oberhalb 300 m ü. NN) die Gefährdungslage etwas zu hoch eingeschätzt wurde (falsch positiv – siehe Tabelle 2.0.1) sowie dass die Gefährdungsabschätzung mit Blick auf den Pegel Radeberg (tatsächlich Alarmstufe 2 überschritten) eventuell etwas zu konservativ war.

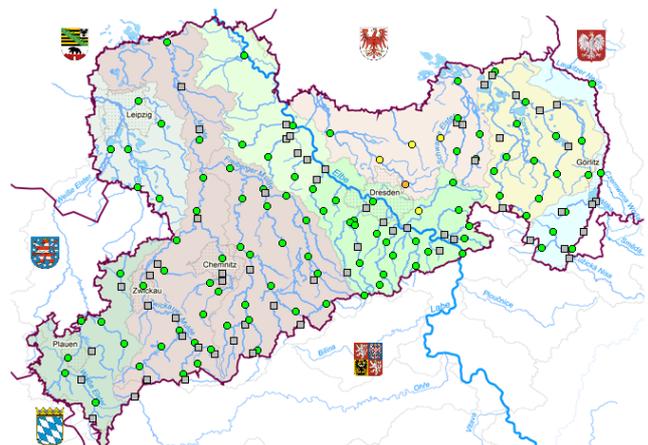
Gleichwohl sei an dieser Stelle noch einmal deutlich gesagt, dass die Gefährdungsklassen des Frühwarnprodukts nicht direkt mit Alarmstufen-Richtwerten an Meldepegeln korrespondieren! Nichtsdestotrotz zeigt sich für die betroffenen, kleinen Einzugsgebiete (siehe Abbildung 12.4.9), dass das bei der Frühwarnung verwendete Regelsystem gewisse Rückschlüsse von Frühwarn-Gefährdungsstufen auf an Pegeln *kleiner Einzugsgebiete* zu erwartende Überschreitungen von Alarmstufen-Richtwerten ermöglicht.

## Feb. 2017 – Überregionales Hochwasser mit Schneeschmelze

In der letzten Februardekade 2017 herrschte eine unbeständige, regenreiche und milde Witterung vor. Vor allem im Erzgebirge gab es zu Beginn dieser Periode noch signifikante Schneerücklagen. Die allgemein steigenden Temperaturen in besagten Zeitraum führten in Verbindung mit dem flüssigen Niederschlag zu größeren Dargebo-



**Abbildung 12.4.8:** Frühwarn-Ampelkarte (Prognose); Vorhersagezeitpunkt: 28.12.2016, 07:00 Uhr MEZ, QPE: RADOLAN-RW, QPF: COSMO-DE (00:00-UTC-Lauf).

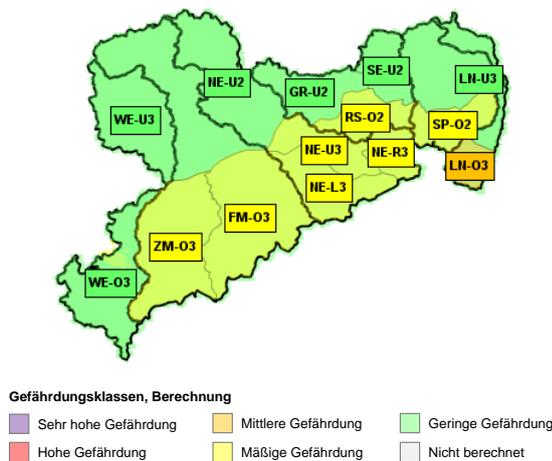


**Abbildung 12.4.9:** Übersicht maximaler Warnstatus an den sächsischen Hochwassermeldepegeln für den 28. und 29.12.2016 (gelb: Richtwert der Alarmstufe 1 erreicht oder überschritten, orange resp. für Alarmstufe 2).

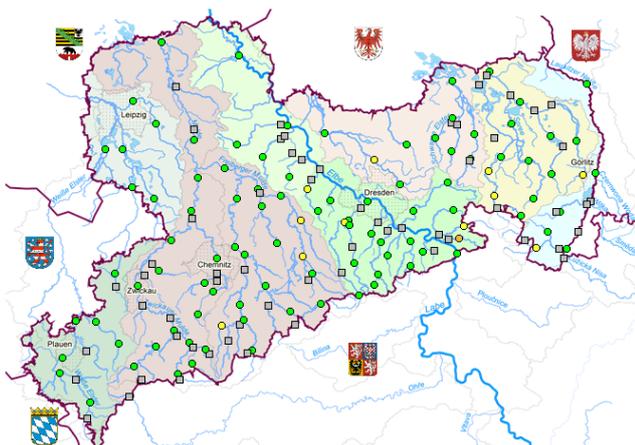
ten,<sup>1</sup> welche vor allem am 22./23.02.2017 zu gebietsweisen Überschreitungen der Richtwerte der Alarmstufe 1 an Meldepegeln kleinerer Gewässer führten. Am Pegel Lichtenhain/Kirnitzsch wurde der Richtwert der Alarmstufe 2 überschritten. Im weiteren Verlauf lief das Hochwasser ab und führte teilweise zum Erreichen/Überschreiten des 2. Alarmstufen-Richtwertes (z. B. in der Vereinigten Mulde).

Durch den großräumigen, skaligen Charakter waren die Niederschläge gut mittels NWP vorhersagbar. Für die Schneeschmelz-/Dargebotsprognose nutzt das LHWZ das

<sup>1</sup>Das Dargebot ist die Summe aus flüssigem Niederschlag und der abflusswirksamen Schmelzwassermenge.



**Abbildung 12.4.10:** Frühwarn-Ampelkarte (Prognose); Vorhersagezeitpunkt: 22.02.2017, 07:00 Uhr MEZ, QPE/QPF: SNOW4 (00:00-UTC-Lauf).



**Abbildung 12.4.11:** Übersicht maximaler Warnstatus an den sächsischen Hochwassermeldepegeln für den 22. und 23.02.2017 (gelb: Richtwert der Alarmstufe 1 erreicht oder überschritten, orange resp. für Alarmstufe 2). Ein Pegelstatus im Bereich von Alarmstufen-Richtwerten wird – mit Blick auf die räumliche Gültigkeit der Frühwarnung – nur für Hochwassermeldepegel mit Einzugsgebieten kleiner 500 km<sup>2</sup> dargestellt!

DWD-Produkt SNOW4, welches als QPE/QPF dem Hochwasserfrühwarnsystem zur Verfügung steht (vergleiche Abschnitt 11.3.4). Durch die Verarbeitung einer Dargebotsvorhersage ist das System in der Lage, auch für durch Schneeschmelze verursachte/beeinflusste Lagen eine qualifizierte Prognose der Hochwassergefährdung zu liefern. In Zusammenschau der Abbildungen 12.4.10 und 12.4.11 wird deutlich, dass durch die Frühwarnung eine sehr gute Prognose über die in den kleinen Einzugsgebieten zu erwartende Hochwassergefährdung getroffen werden konnte.

WARNLAGEBERICHT für  
Sachsen

ausgegeben vom Deutschen Wetterdienst  
am Sonntag, 14.05.2017, 10:30 Uhr

Heute tagsüber Gewitter, teils unwetterartig. Montagfrüh örtlich Nebel und nachmittags einzelne Gewitter.

Entwicklung der Wetter- und Warnlage für die nächsten 24 Stunden bis  
Montag, 15.05.2017, 10:30 Uhr:

Zwischen einem Tief über West- und einem Hoch über Osteuropa ist warme, feuchte und zu Gewittern neigende Luft aus südlichen Breiten nach Sachsen eingeflossen.

Heute treten nach Nordost ziehende Gewitter auf. Sie können vor allem in der Osthälfte Sachsens mit Starkregen bis 25 l/qm, eng begrenzt um 30 l/qm (UNWETTER) innerhalb kurzer Zeit, stürmischen Böen um 70 km/h (Bft8) und Hagel verbunden sein.

In der Nacht zum Montag klingen die Gewitter langsam ab. In den Frühstunden kann sich stellenweise Nebel unter 150 m bilden. Am Montag sind nochmals einzelne Gewitter möglich.

Nächste Aktualisierung: spätestens Sonntag, 14.05.2017, 14:30 Uhr  
Deutscher Wetterdienst, RWB Leipzig, Jens Oehmichen

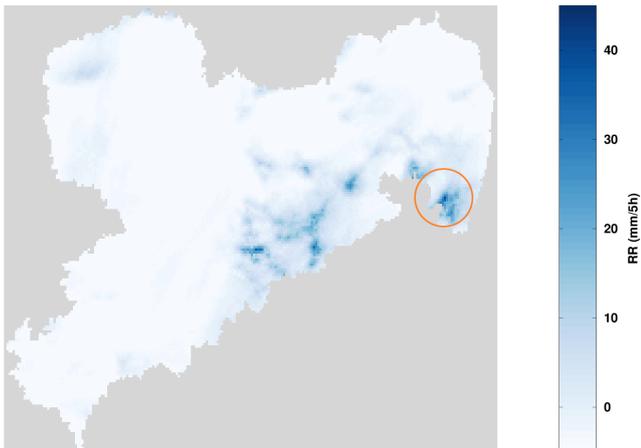
**Abbildung 12.4.12:** DWD-Warnlagebericht Sachsen für Sonntag, 14.05.2017, 10:30 Uhr MESZ.

Lediglich das Signal für „mittlere Gefährdung“ war mit Blick auf das Vorhersagegebiet LN-O3 (Lausitzer Neiße oberhalb 300 m ü. NN) eventuell leicht überschätzt, wohingegen am Pegel Lichtenhain/Kirnitzsch (Vorhersagegebiet NE-R3 – rechte Nebenflüsse der Elbe, oberhalb 300 m ü. NN) kurzzeitig der Richtwert der Alarmstufe 2 überschritten wurde, was eine leichte Unterschätzung durch die Prognose bedeutet.

### 14.05.2017 – Sturzflut Spitzkunnersdorf/Oberlausitz

Eine feuchtwarme, stark labilisierte Luftmasse bildete im Verlauf des Sonntags, den 14.05.2017, den Nährboden für betonte, hochreichende Konvektion. Der Fokus lag dabei insbesondere auf Ostsachsen. Die Luftmasse wies dabei teilweise beträchtliche Wassergehalte auf, was in entsprechenden amtlichen Warnungen des DWD vor teilweise unwetterartigen Gewittern mit Starkregen auch so antizipiert wurde (siehe Abbildung 12.4.12).

Die meteorologischen Bedingungen führten im Tagesverlauf dann in der Tat zu lokal eng begrenzten Starkregenereignissen mit maximalen Regenmengen jenseits der 30 mm in kurzer Zeit. Abbildung 12.4.13 zeigt die aus RADOLAN-RW abgeleitete 5-h-Summe für Sachsen. Besonders in Spitzkunnersdorf (Oberlausitz) kam es dabei



**Abbildung 12.4.13:** Aus RADOLAN-RW gebildete 5-h-Summe bis 14.05.2017, 16:50 Uhr MESZ; Ereignis Spitzkunnersdorf farbig markiert.

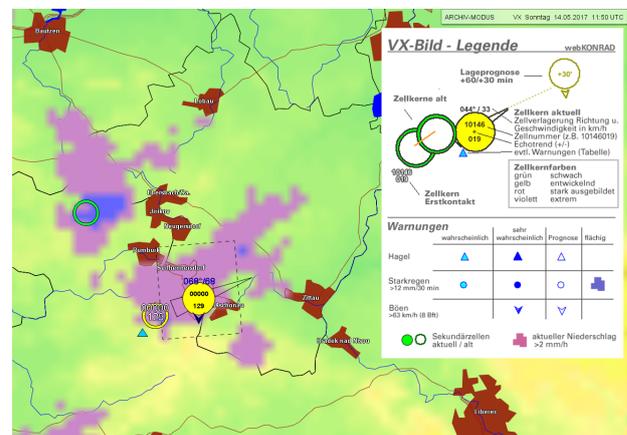


**Abbildung 12.4.14:** Eindruck des Ereignisses vom 14.05.2017 in Spitzkunnersdorf (Bild aus Videostill); (c) Paul Michel (mit freundlicher Genehmigung des Urhebers). Auf Twitter wurde das Video mit der Zeitangabe „[aufgenommen] gegen 14:00 Uhr [MESZ]“ verbreitet, wobei sich diese Information nicht verifizieren lässt.

zu schadensträchtigen Abflussereignissen, gepaart mit teilweise erheblichen Massenbewegungen.

Wild abfließendes Wasser, Verfrachtung von Bodenmaterial sowie Ausuferung des Spitzkunnersdorfer Dorfbaches verursachten Schäden (Abbildung 12.4.14). Die Hauptmenge des Niederschlags fiel in ca. 20 min; es kam zu einer fast zeitgleichen Intensivierung des Abflussgeschehens. Im Falle dieses Ereignisses hätte eine rein QPE-basierte Frühwarnung (siehe Abschnitte 1.1 und 2.1), beispielsweise auf Basis von Radardaten, keine relevante Vorwarnzeit generiert! Zusätzlich hätten auch auf Zelltracking basierte Nowcasting-Verfahren (Abschnitt 2.1) keinen Nutzen gehabt, da die Gewitterzelle auf dem Radar erst ca. 13:45 Uhr MESZ sichtbar wurde, gewissermaßen kurz vor dem Bereich der dann erreichten Spitzenintensitäten (siehe Abbildung 12.4.15).

Das Hochwasserfrühwarnsystem zeigte im 12-Uhr-MESZ-Lauf (also ca. 2 h vor dem Ereignis) eine mäßige Gefährdungslage für das später betroffene Vorhersagegebiet LN-O3 (Lausitzer Neiße oberhalb 300 m ü. NN), wobei die prognostizierte Gefährdung (ausgedrückt durch den Gesamtscore des ScoHM-Verfahrens, siehe Abschnitt 8.1.3) offenkundig direkt nach dem Vorhersagezeitpunkt ansteigt (siehe Abbildung 12.4.16). Obgleich die lokalen Auswirkungen tendenziell die Gefährdungsstufe mittlere Gefährdung (orange) gerechtfertigt hätten, ist das dennoch ein sehr gutes Ergebnis, bedenkt man die Genese der auslösenden Zelle. Die verwendete QPF (COSMO-DE) hatte in ihrem 06:00-UTC-Lauf (08:00 Uhr MESZ) die dann tatsächlich stattfindende konvektive Entwicklung hinsichtlich Menge

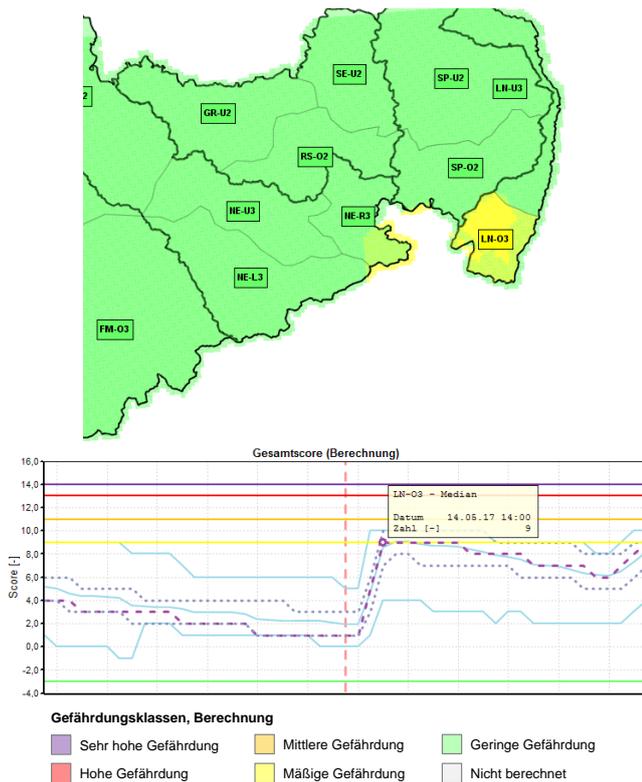


**Abbildung 12.4.15:** DWD-Verfahren Konvektionsentwicklung in Radarprodukten (KONRAD): Identifikation der für den Bereich Spitzkunnersdorf relevanten Gewitterzelle mit Position und prognostizierter Zugbahn für den 14.05.2017, 13:50 Uhr MESZ.

und Verortung sehr gut abgebildet, was bei Ereignissen dieser Charakteristik aber eher die Ausnahme als die Regel darstellt.

## 28./29.06.2017 – Starkregen in Ost- und Westsachsen

Nach einer längeren Phase mit Hochdruckeinfluss, stellte sich vor allem am 28.06.2017 die Wetterlage um (Trog Westeuropa/Tief Mitteleuropa). Es gelangte auf der Vorderseite eines breiten Troges unter einer südlichen Höhenströmung feucht-instabile Warmluft nach Sachsen, was zu ausgeprägter Konvektion und lokal unwetterartigen Niederschlagsmengen jenseits von 50 mm in kurzer Zeit führte. In der Nacht zum 29.06. kam es über Tschechien zur Zykloge-



**Abbildung 12.4.16:** Frühwarn-Ampelkarte (Prognose) sowie zeitlicher Verlauf der pixelweisen Gesamtscores (Minimum, unteres Quartil, Mittelwert, Median, oberes Quartil, Maximum) über alle Zellen des Vorhersagegebietes LN-03 (Lausitzer Neiße oberhalb 300 m ü. NN); Vorhersagezeitpunkt: 14.05.2017, 12:00 Uhr MESZ, QPE: RADOLAN-RW, QPF: COSMO-DE (06:00-UTC-Lauf).

nese.<sup>1</sup> Das resultierende Tief zog nordwärts und verstärkte sich dabei deutlich. Durch das Tief intensivierte sich die Heranführung feuchtwarmer Luftmassen. Damit einher gingen andauernde, konvektiv durchsetzte (verstärkte) und sich nach Norden ausbreitende Regenfälle. Das Tief hatte damit eine „klassische“ Vb-Zugbahn.<sup>2</sup>

An beiden Tagen bewegten sich die lokalen, kurzzeitigen Niederschlagsmengen jenseits von 50 mm in 6 h (z. B. Station Dürrhennersdorf: 54,2 mm in 6 h bis 29.06., 14:00 Uhr MESZ). Verbreitet waren in Ostsachsen vor allem am 29.06. mehr als 30 mm in 24 h und mehr als 50 mm in 48 h zu verzeichnen (Abbildung 12.4.17). In Westsachsen/Vogtland fielen die Niederschläge etwas geringer aus

<sup>1</sup> Der Tiefdruckwirbel entstand durch PVA (Positive Vorticity Advection) und diabatische Effekte.

<sup>2</sup> Obschon für ein „klassisches“ Vb-Tief die Zyklgenese über dem Golf von Genua stattfindet. Diese Klassifikation („Zugstraßentypologie“) geht auf den Meteorologen Wilhelm Jacob van Beber zurück (\*1841; †1909), ist aber heute – bis auf wenige Ausnahmen, wie die „Vb“ – nicht mehr gebräuchlich.

(Fokus: 29.06.), bewegten sich aber auch hier um 20 bis 30 mm in 24 h, lokal deutlich darüber, z. B. mit 70 mm Tagesniederschlag an der Talsperre Muldenberg. In den sächsischen Fließgewässern herrschte zu Beginn der Ereignisses verbreitet Niedrigwasserführung und die relativen Bodenfeuchtwerte betrug im Freistaat lediglich zwischen 30 und 50 % der nutzbaren Feldkapazität.

An einigen Hochwassermeldepegeln im Flussgebiet der Schwarzen Elster (Kamenz 1, Prischwitz, Zescha) wurden in Folge der Niederschläge ab dem Nachmittag des 28.06. kurzzeitig die Richtwerte der Alarmstufen 1 überschritten. Am 29.06. wurde an den Meldepegeln Großschweidnitz sowie Gröditz 2 am Löbauer Wasser der Richtwert der Alarmstufe 1 überschritten (Flussgebiet Spree). Am Meldepegel Rodewisch 1/Göltzsch (Flussgebiet Obere Weiße Elster) wurde kurzzeitig die Alarmstufe 1 überschritten, maßgeblich durch ein dynamisches Entlastungsereignis aus dem Stadtgebiet Rodewisch. In Ost- und Westsachsen gab es eine Vielzahl von lokalen Überflutungen in deren Folge Keller ausgepumpt, kleinere Straßen gesperrt und sonstige Auswirkungen des Starkregens bekämpft werden mussten (siehe beispielsweise Abbildung 12.4.18).

Abbildung 12.4.19 zeigt die operationell erstellten Prognosen aus dem Frühwarnverfahren (obere Zeile) sowie die zu denselben Vorhersagezeitpunkten korrespondierenden Hindcasts; hierbei wird die Frühwarnung retrospektiv – aufgrund bereits bekannter Niederschläge (hier: RADOLAN-RW) – erstellt (mittlere Zeile). Mit Blick auf die im Pegelmessnetz beobachteten (untere Zeile) sowie berichteten Auswirkungen (vergleiche Abbildung 12.4.18) kann dem Frühwarnprodukt für das betrachtete Ereignis eine hohe Güte attestiert werden. Lediglich die Gefährdungslage in Westsachsen/Vogtland war schwierig zu prognostizieren, was allerdings an Unsicherheiten in der quantitativen Niederschlagsvorhersage lag, wie der Vergleich mit dem Hindcast-Szenario belegt. Bemerkenswert ist, dass die Frühwarnung trotz der generell verbreitet hohen Niederschlagsmengen eine realistisch-konservative Prognose lieferte, was ein klares Indiz für die Sinnhaftigkeit der gewählten Verarbeitung von Vorfeuchtebedingungen ist.

## 10.07.2017 – Starkregen in Nordsachsen

In Folge einer Tiefdrucksituation (kleinräumiges Tief über Mitteleuropa) wurde feuchtwarme Luft nach Sachsen herangeführt, was zu Schauern und Gewittern mit Starkregen führte. Insbesondere Nordsachsen war davon betroffen

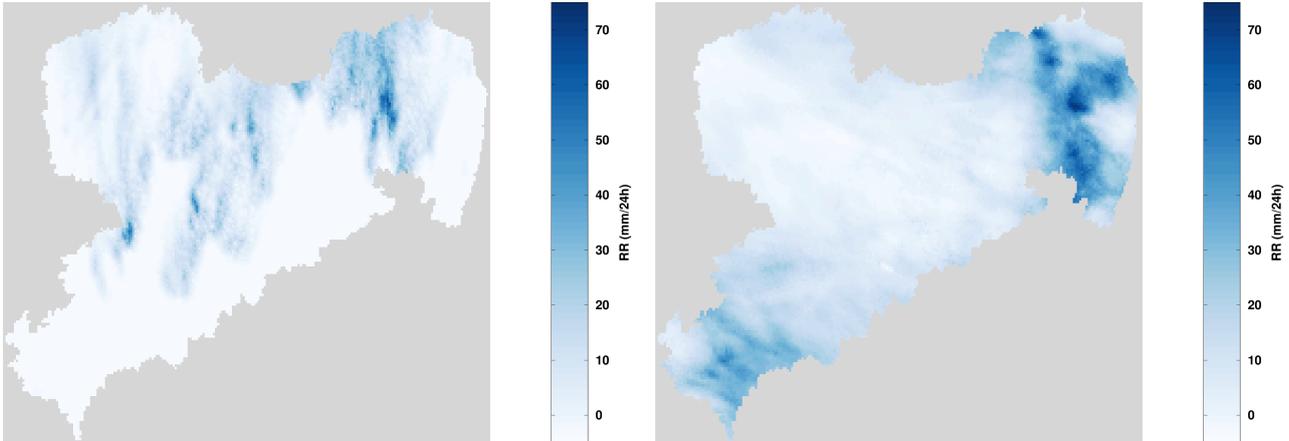


Abbildung 12.4.17: Aus RADOLAN-RW gebildete 24-stündige Radar-QPEs für Sachsen; links: 28.06., rechts: 29.06.2017 (jeweils gebildet bis 23:50 Uhr MESZ).

Sächsische Zeitung Bautzen  
30.06.2017

## Unwetter überm Landkreis

Dauerregen und Gewitter lassen die Pegel in Flüssen und Bächen ansteigen. Mancherorts kommt es dicke.

VON JANA ULBRICH UND INA FÖRSTER

Es schüttet schon stundenlang wie aus Kannen. Eine sogenannte FünFB-Wetterlage hat sich breitgemacht an diesem Donnerstag: ein Tiefdruckgebiet, das sich festhängt und das große Regenmengen mitbringt. Spätestens seit dem 7. August 2010 wissen alle im Kreis Bautzen, was das bedeutet: Hochwasser- und Überschwemmungsgefahr!

Der deutsche Wetterdienst sagt Niederschlagsmengen von bis zu 110 Litern pro Quadratmeter voraus. Es könnten wieder Straßen überflutet werden und vor allem kleinere Gewässer über die Ufer treten. Im Landeshochwasserzentrum haben Rainer Elze und seine Mitarbeiter deshalb schon am Morgen den Hochwassernachrichtendienst eröffnet. Am frühen Nachmittag geben sie die ersten Warnungen für die Spree und die Schwarze Elster heraus. An beiden Flüssen werden die Pegel im Laufe des Donnerstags Alarmstufe 2 erreichen.

Aber Keiner Elze bleibt zuversichtlich: „Nach allem, was wir sehen, ist die Wetterlage längst noch nicht mit der zu vergleichen, mit der wir es bei den Hochwassern 2010 und 2013 zu tun hatten“, sagt der stellvertretende Leiter des Landeshochwasserzentrums. Zwar ist abzusehen, dass es noch bis in die Nacht hinein weiterregnen wird. Doch am späten Nachmittag hellt sich der Himmel stellenweise wieder auf – ein gutes Zeichen. In der zentralen Rettungsleitstelle in Hoyerswerda sind die Mitarbeiter trotzdem auf den Ernstfall vorbereitet. „Wenn wir mehr Leute brauchen, weil sich – so wie am Mittwochabend – die Telefone heiß klingeln, dann bleibt die Frühschicht zum Schichtwechsel eben da“, sagt Lagedienstführer Lutz Strehlitz.

Auch die Feuerwehren sind vorsichtshalber in erhöhter Bereitschaft. In den Ortschaften kontrollieren die freiwilligen Kräfte die Lage an den Flüssen, Bächen und

Wehren. Vielerorts hat sich nach den Erfahrungen von 2010 und 2013 der Hochwasserschutz stark verbessert. Auch das trägt zur Beruhigung der Lage bei. Dennoch sind die Einsatzkräfte wachsam bei solchen Wetterlagen.

### 130 Feuerwehreinsätze im Landkreis

Denn wie schnell es gehen kann, das hat der Mittwochabend gezeigt. Starkregen, Sturm und tischtennisballgroße Hagelkörner über weiten Teilen des Landkreises – kurz, aber heftig. 130 Feuerwehreinsätze zählt die Rettungsleitstelle in nur wenigen Stunden. Besonders trifft es die Region zwischen Bautzen, Kamenz und Hoyerswerda. Allein in Bautzen rücken die Feuerwehrleute zu 78 Einsätzen aus.

„Schon am Mittwochnachmittag gegen 16 Uhr entwickelte sich das Gewitter zuerst im Raum Lichtenberg, um dann als voll ausgereiftes und um sich drehendes Hagelgewitter über Lückersdorf und Kamenz weiter nach Nordosten zu ziehen“, so erklärt Hobby-Meteorologe Jens Tischer die Situation. „Am Südrand gab es den klassischen rotierenden Aufwindteller“, beschreibt der Lückersdorfer. Dabei fallen örtlich bis zu 30 Millimeter Regen in nur einer Viertelstunde. Und strichweise gehen Hagelschauer mit Körnern von zwei bis drei Zentimetern Durchmesser nieder – vor allem auf der Linie Gelenau, Kamenz und Deutschbaselitz. Aus Kamenz-Jesau werden sogar bis zu fünf Zentimeter dicke Eisstücke gemeldet.

### Überforderte Kanalnetze in Städten

Das heftige Gewitter bleibt nicht ohne Folgen. Auf der Kamenzener Weinbergstraße zum Beispiel bricht durch eine Unterspülung stellenweise das marode Pflaster ein, das in den letzten Jahren schon oft zusammengeklückt worden war. Eine geplante Sanierung des Straßenabschnitts war erst im Frühjahr auf 2018 verschoben worden.

Umso verärgerter sind nun die Anwohner, dass es sie wieder getroffen hat. Der Abschnitt bleibt vorerst voll gesperrt.

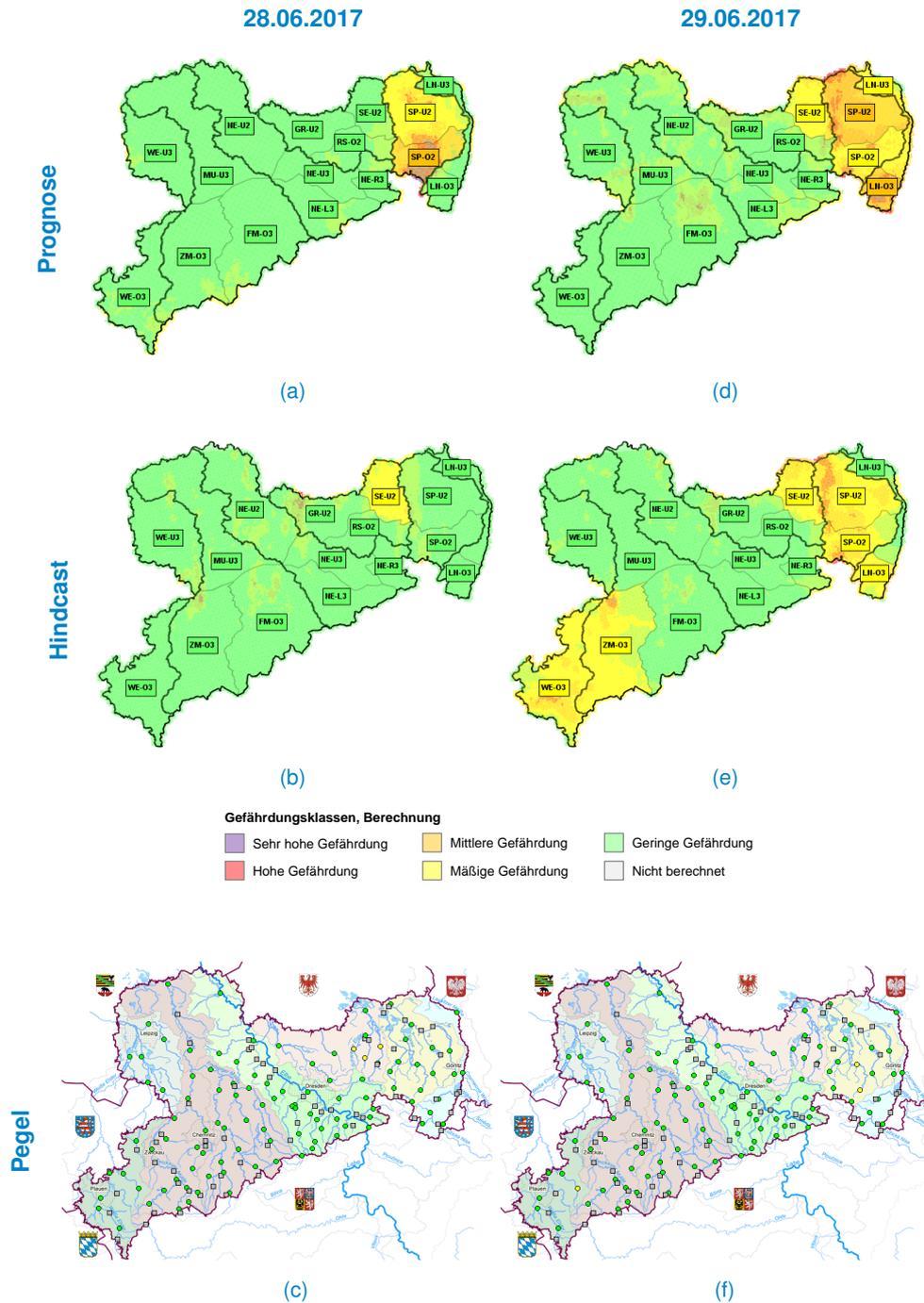
An der Landstraße zwischen Putzkau und Schmölln stürzt ein Baum quer über die Straße und reißt eine Telefonleitung mit. Vielerorts werden Straßen überflutet, laufen Keller voller Wasser. In Bernbruch läuft Regenwasser in die Laderampen der Firma Accumotive. In den Dörfern kämpfen die Feuerwehrleute mit Schlamm, der von den Feldern gespült wird.

In den Stadtgebieten von Bautzen und Kamenz kann die Kanalisation die Wassermassen stellenweise nicht mehr fassen. In Bautzens Innenstadt passiert das nicht zum ersten Mal. So steht das Wasser auch diesmal wieder in den Keller- und Lagerräumen des Café Marx am Bautzener Postplatz 30 Zentimeter hoch. Vorräte und Zutaten für den Cafébetrieb sind hin. Bäckereichefin Manuela Marx ist sauer. „Wir haben uns extra ein Bassin einbauen lassen, das 8000 Liter fasst und als Pufferzone dienen soll“, erzählt sie. Aber selbst das reicht dieses Mal nicht aus. Die Café-Besitzer fühlen sich im Stich gelassen. „Die Kanalisation in der Bautzener Innenstadt ist solchen Regengüssen überhaupt nicht gewachsen“, glaubt Manuela Marx.

Betroffen ist dieses Mal auch die Bautzener Feuerwehr selbst. Hinter der Feuerwache im Stadtteil Gesundbrunnen rutscht ein Hang ab. Die Schlammlawine endet an der Wand der Fahrzeughalle.

Alles in allem aber ist der Kreis beim Unwetter am Mittwochabend noch glimpflich davongekommen. Und am Donnerstagsabend macht sich wieder die Erleichterung breit. Die Vorhersagen des Deutschen Wetterdienstes sind zum Glück nicht noch einmal mit voller Wucht eingetroffen. Am Wochenende soll sich die Wetterlage wieder beruhigen.

Abbildung 12.4.18: Artikel der Sächsischen Zeitung (Ausgabe Bautzen) vom 30.06.2017 zu den Auswirkungen des Starkregenereignisses vom 28./29.06.2017 im Landkreis Bautzen; (c) DDV Mediengruppe.



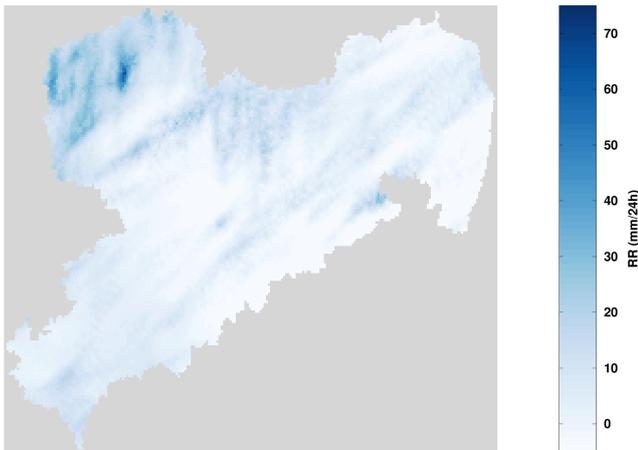
**Abbildung 12.4.19:** Frühwarn-Ampelkarten und Warnstatus für das Ereignis 28./29.06.2017; linke Spalte: 28.06.2017, rechte Spalte: 29.06.2017; obere Zeile: Prognosen (QPE: RADOLAN-RW, QPF: COSMO-DE), mittlere Zeile: Hindcasts (diagnostisch-retrospektive Betrachtung ausschließlich mit nunmehr bekanntem RADOLAN-QPE), untere Zeile: beobachteter Warnstatus an den Meldepegeln.

(a + b) Vorhersagezeitpunkt: 28.06., 08:00 Uhr MESZ, QPE: RADOLAN-RW, QPF: COSMO-DE (00:00-UTC-Lauf).

(d + e) Vorhersagezeitpunkt: 29.06., 08:00 Uhr MESZ, QPE: RADOLAN-RW, QPF: COSMO-DE (00:00-UTC-Lauf).

(c) Übersicht maximaler Warnstatus an den sächsischen Hochwassermeldepegeln für den 28.06.2017.

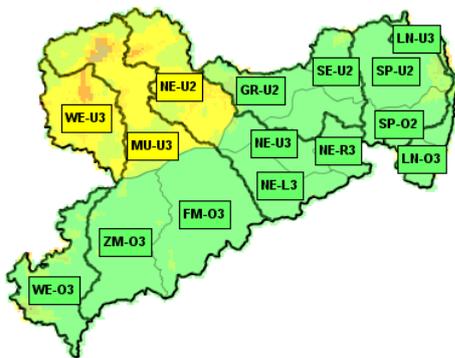
(f) Übersicht maximaler Warnstatus an den sächsischen Hochwassermeldepegeln für den 29.06.2017.



**Abbildung 12.4.20:** Aus RADOLAN-RW gebildete 24-h-Summe bis 11.07.2017, 07:50 Uhr MESZ.



**Abbildung 12.4.22:** Übersicht maximaler Warnstatus an den sächsischen Hochwassermeldepegeln für den 10.07.2017 (gelb: Richtwert der Alarmstufe 1 erreicht oder überschritten).



**Gefährdungsklassen, Berechnung**

<span style="display:inline-block; width:10px; height:10px; background-color:purple; border:1px solid black;"></span> Sehr hohe Gefährdung	<span style="display:inline-block; width:10px; height:10px; background-color:orange; border:1px solid black;"></span> Mittlere Gefährdung	<span style="display:inline-block; width:10px; height:10px; background-color:green; border:1px solid black;"></span> Geringe Gefährdung
<span style="display:inline-block; width:10px; height:10px; background-color:red; border:1px solid black;"></span> Hohe Gefährdung	<span style="display:inline-block; width:10px; height:10px; background-color:yellow; border:1px solid black;"></span> Mäßige Gefährdung	<span style="display:inline-block; width:10px; height:10px; background-color:lightgrey; border:1px solid black;"></span> Nicht berechnet

**Abbildung 12.4.21:** Frühwarn-Ampelkarte (Prognose); Vorhersagezeitpunkt: 10.07.2017, 05:00 Uhr MESZ, QPE: RADOLAN-RW, QPF: COSMO-DE (00:00-UTC-Lauf).

fen; hier waren 24-h-Niederschläge von gebietsweise um 60 mm, lokal auch darüber, zu verzeichnen (Abbildung 12.4.20). Eine recht gute QPF durch COSMO-DE ermöglichte eine gute Prognose der Hochwassergefährdung (Abbildung 12.4.21); tatsächlich kam es in Nordsachsen am 10.07.2017 zu einer Vielzahl kleinerer lokaler Überflutungen. Am Abend wurde am Hochwassermeldepegel Thekla an der Parthe, gelegen im Stadtgebiet Leipzig, der Richtwert der Alarmstufe 1 überschritten (Abbildung 12.4.22).

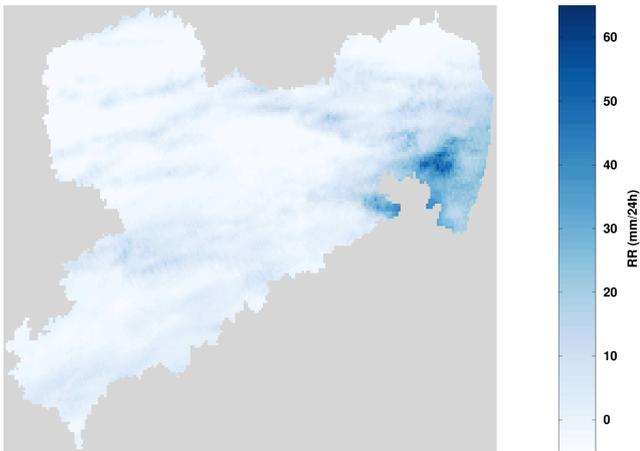
### 11.07.2017 – Starkregen in der Oberlausitz

In Folge der im Vergleich zum 10.07.2017 weitgehend unveränderten synoptischen Situation führten Tiefausläufer

mit schwachen Luftdruckgegensätzen zu weiterhin unbeständigem Wetter mit Gewittern, begleitet von Starkregen (Abbildung 12.4.23). Lokal betrug die Niederschlagshöhen um die 40 mm in 6 h – z. B. 39,7 mm bis 14:00 Uhr MESZ an der Station Löbau, was zu Überflutungen im Stadtgebiet führte.

Generell hatte die numerische Wettervorhersage für den 11.07.2017 deutliche Signale für Starkregen enthalten; beispielsweise sorgten die Signale des 00:00-UTC-Laufes von COSMO-DE in der Frühwarnung für die Einfärbung einiger Bereiche mit den Gefährdungsklassen mäßig und mittel (gelb und orange; siehe Abbildung 12.4.24, oben). Auch war in der NWP eine gewisse Tendenz zu erkennen, dass die Niederschläge vor allem Ostsachsen betreffen könnten. Neben der unsicheren Verortung der Starkregengebiete, reichte weiterhin die vom Scoring-Verfahren angebotene zellweise Gefährdungsabschätzung nicht aus, um die gebietsweisen Warnkriterien des Frühwarnverfahrens zu triggern (siehe Tabelle 11.3.2). Schlussendlich mündete dies in einer falsch-negativen Prognose (Ereignis eingetreten, aber nicht vorhergesagt).

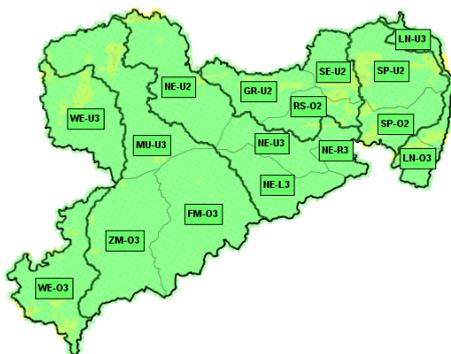
Nichtsdestotrotz zeigt ein Blick auf die Hindcast-Analyse (Abbildung 12.4.24, unten), dass das Verfahren inklusive seiner Parametrisierung – bei als bekannt angenommener Niederschlagsverteilung – sehr wohl in der Lage war, die Hochwassergefährdung hinsichtlich der Ereignismagnitude mit hoher Güte zu prognostizieren (siehe dazu auch Abbildung 12.4.25 mit einer vermerkten kurzzeitigen Alarmstufen-Überschreitung am Pegel Großschweidnitz/Löbauer Wasser). Im Umkehrschluss werden abermals



**Abbildung 12.4.23:** Aus RADOLAN-RW gebildete 24-h-Summe bis 12.07.2017, 07:50 Uhr MESZ.



**Abbildung 12.4.25:** Übersicht maximaler Warnstatus an den sächsischen Hochwassermeldepegeln für den 11.07.2017 (gelb: Richtwert der Alarmstufe 1 erreicht oder überschritten).



**Gefährdungsklassen, Berechnung**

<span style="color: purple;">■</span> Sehr hohe Gefährdung	<span style="color: orange;">■</span> Mittlere Gefährdung	<span style="color: lightgreen;">■</span> Geringe Gefährdung
<span style="color: red;">■</span> Hohe Gefährdung	<span style="color: yellow;">■</span> Mäßige Gefährdung	<span style="color: grey;">■</span> Nicht berechnet

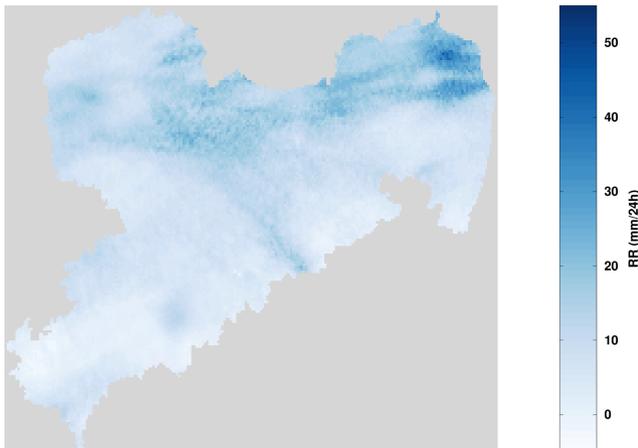
**Abbildung 12.4.24:** Frühwarn-Ampelkarten (Prognose und Hindcast) für den Vorhersagezeitpunkt 11.07.2017, 08:00 Uhr MESZ; oben: Prognose (QPE: RADOLAN-RW, QPF: COSMO-DE, 00:00-UTC-Lauf), unten: Hindcast (diagnostisch-retrospektive Betrachtung ausschließlich mit nunmehr bekanntem RADOLAN-QPE).

anhand dieses Beispiels die durch die Güte der quantitativen Niederschlagsvorhersage gesetzten Grenzen bei der kleinräumigen Hochwasserfrühwarnung deutlich.

Nicht unerwähnt soll an dieser Stelle bleiben, dass mit dem sächsischen Frühwarnsystem aber in jedem Falle ab dem Zeitpunkt, zu dem die Niederschlagsverteilung bekannt ist (Bereitstellungszeit für RADOLAN-RW ca. 25 Minuten nach Echtzeit), exakte Prognosen – in der Größenordnung Reaktionszeit des betrachteten Gebietes minus Bereitstellungszeit des QPE – möglich sind. Allerdings sind sehr kleinräumige, extreme Ereignisse (z. B. Braunsbach 2016) und ihre hydrologischen Effekte faktisch nicht vorhersagbar (siehe dazu auch die Ausführungen in Abschnitt 1.5)!

### 12.07.2017 – Weiterhin lokaler Starkregen in Sachsen

Das unbeständige Wetter der vergangenen Tage hielt auch am 12.07.2017 noch an. Ein weiteres kleinräumiges Tief überquerte von Westen kommend Sachsen und zog recht rasch nach Osten ab. Dabei wurden erneut feuchtwarme, labile Luftmassen aus Südosten herangeführt, was wiederum zu Niederschlägen führte, welche zumindest lokal die Kriterien für Starkregen erfüllten (z. B. mehr als 35 mm in 6 h; siehe Abbildung 12.4.26). Die dem Tief zugehörige Kaltfront überquerte Sachsen in der Nacht zum 13.07., was im Nachgang zum Einströmen wesentlich kühlerer Luftmassen führte. Damit war ab dem 13.07.2017 zunächst

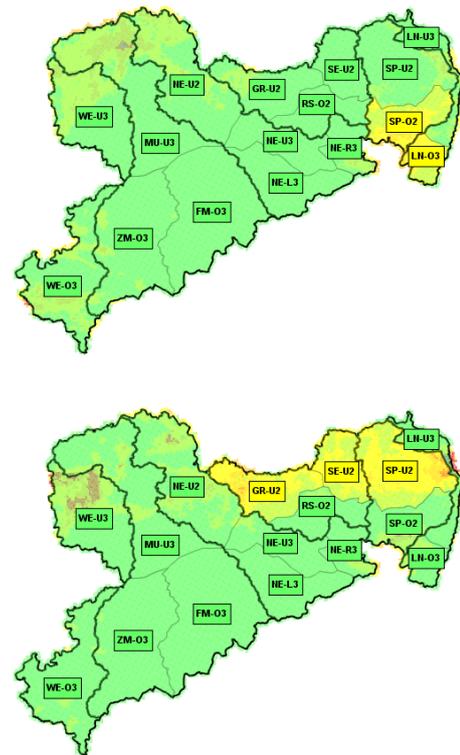


**Abbildung 12.4.26:** Aus RADOLAN-RW gebildete 24-h-Summe bis 13.07.2017, 07:50 Uhr MESZ.

die unbeständige, schwüle und regenreiche Witterungssituation beendet.

Was die Hochwasserfrühwarnung anbelangt ist zunächst interessant, dass die Prognose für den Vorhersagezeitpunkt 12.07., 08:00 Uhr MESZ (Abbildung 12.4.27, oben) sehr stark dem Hindcast für den 11.07., 08:00 Uhr MESZ ähnelt (Abbildung 12.4.24, unten). Hier wird erkennbar, dass bereits vor dem 12.07., 08:00 Uhr gefallene Niederschläge (welche im Hindcast des vorangegangenen Tages bekannt sind!) maßgeblich die Ausweisung einer mäßigen Gefährdung für die Gebiete SP-O2 und LN-O3 bedingen. Gefallene Niederschläge wirken sich also gewissermaßen ein Stück weit in die Zukunft aus, was gewollt ist und methodisch durch die Verwendung des Speichergliedes für die Wichtung von Stundenniederschlägen erreicht wird (siehe Abschnitt 11.3.5). Mit anderen Worten weist die Frühwarnung also eine gewisse „Trägheit“ hinsichtlich des Rückgangs der Gefährdung auf das Ausgangsniveau auf, was hydrologisch natürlich sinnvoll ist.

Tatsächlich waren allerdings für den 12./13.07. keine Überflutungen/Überschwemmungen oder andere niederschlagsbedingte Effekte recherchierbar. Die Prognose vom 12.07. ist – mit Blick auf die zurückgehenden, am 11.07. gestiegenen Durchflüsse – aber als plausibel zu bewerten. Der Hindcast für den 12.07. (Abbildung 12.4.27, unten) zeigt allerdings, dass die Güte der Prognose eher auf eine Unterschätzung der Niederschlagsmengen in der numerischen Wettervorhersage zurückzuführen ist. Mit bekannter Niederschlagsverteilung hingegen zeigt sich im Hindcast-Modus, dass die verwendete Methodik die Gefährdungslage im Bereich Röder/Schwarze Elster/Spree

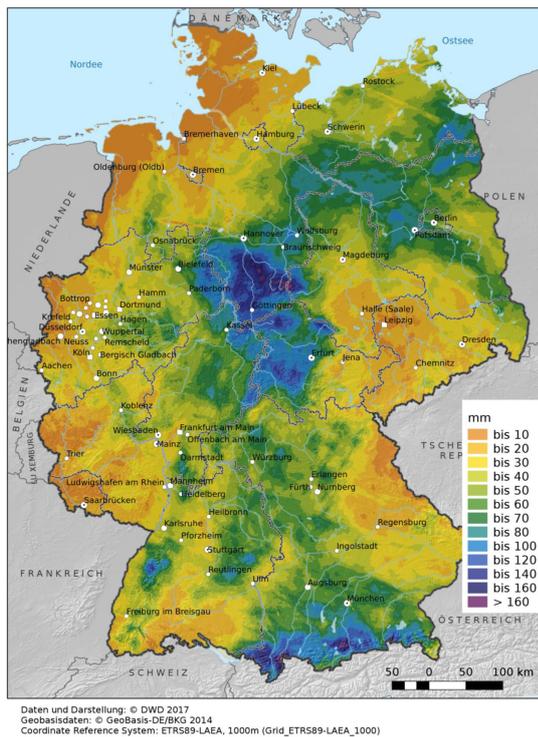


**Abbildung 12.4.27:** Frühwarn-Ampelkarten (Prognose und Hindcast) für den Vorhersagezeitpunkt 12.07.2017, 08:00 Uhr MESZ; oben: Prognose (QPE: RADOLAN-RW, QPF: COSMO-DE, 00:00-UTC-Lauf), unten: Hindcast (diagnostisch-retrospektive Betrachtung ausschließlich mit nunmehr bekanntem RADOLAN-QPE).

leicht überschätzt (falsch positiv). Hierfür ist insbesondere der Teilscore für die 12/24/48-Stunden-Summe (siehe Abschnitt 11.3.2) verantwortlich, welcher in der beschriebenen Situation aufgrund der in den vergangenen Tagen immer wieder aufgetretenen intensiven Niederschläge ein Stück weit zu sensitiv reagiert. Dieser Fehler ist der Tatsache geschuldet, dass ein Modell – ganz gleich welcher Philosophie es folgt – niemals alle in der Natur auftretenden Situation adäquat wiedergeben können wird.

## Ende Juli 2017 – Erneut Stark- und Dauerregen in Deutschland

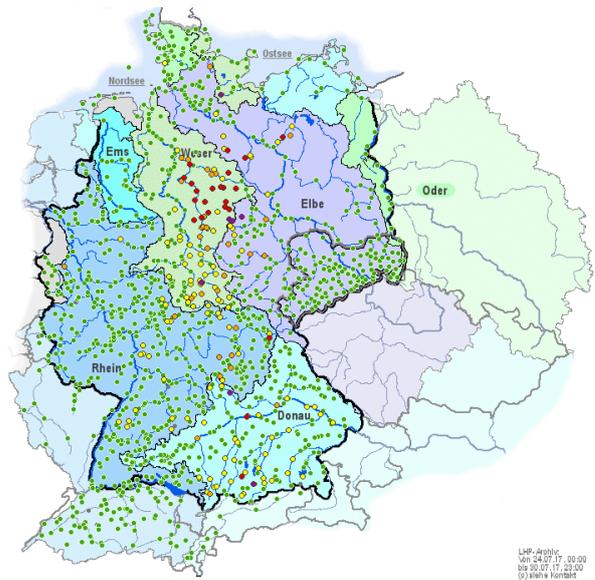
Nach einer vorübergehenden Wetterberuhigung wurden in der letzten Juliwoche 2017 ausgehend vom über den Britischen Inseln liegenden Tief *Alfred* feuchtwarme, labile Luftmassen nach Deutschland geführt. An der Konvergenz



**Abbildung 12.4.28:** Aus RADOLAN-RW gebildete 72-h-Summe bis 27.07.2017, 07:50 Uhr MESZ; (c) DWD.

kam es im weiteren Verlauf immer wieder zu konvektiv induzierten/verstärkten Starkregen, welche weite Teile Deutschlands betrafen und zu einer regionalen (v. a. Harz) sowie überregionalen (durch den Ablauf der Hochwasserwellen; v. a. Niedersachsen) Hochwassersituation führten (siehe Abbildungen 12.4.28 und 12.4.29). Von Sachsen war insbesondere der Osten in der Nacht vom 26. zum 27.07.2017 durch intensivere Niederschläge betroffen, wobei hier die gängigen Starkregenkriterien (z. B. ab 35 mm in 6 h) – wenn auch knapp – verfehlt worden sind.

Die Hochwasserfrühwarnung spiegelte die deutlichen Starkregensignale in der numerischen Wettervorhersage mit Herausgabe einer fast sachsenweit mäßigen bis mittleren Gefährdungslage wider; lediglich für 2 von 16 Vorhersagegebieten wurde eine geringe Gefährdung („grün“) abgeschätzt (Abbildung 12.4.30, oben). Im Pegelmessnetz waren hingegen keine Richtwerte-Überschreitungen zu verzeichnen. Auch die Befragung der sächsischen Rettungsleitstellen erbrachte den Befund, dass es zu keinen kleinräumigen Phänomenen – wie wild abfließendem Wasser, vollgelaufenen Kellern etc. – kam. Es handelt sich also um eine falsch-positive Prognose (Ereignis vorhergesagt aber nicht eingetreten).

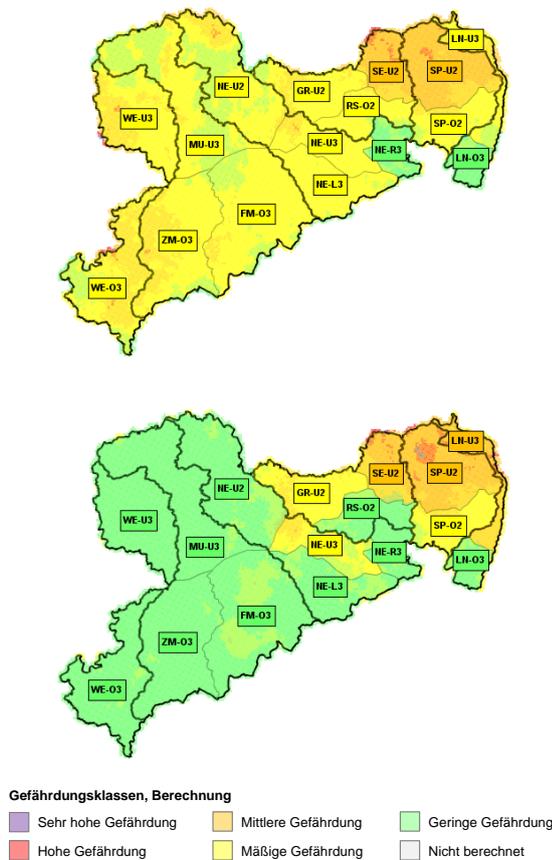


**Abbildung 12.4.29:** Maximaler Warnstatus (LHP-Klassifizierung) der deutschen Hochwassermeldepegel in der Woche vom 24.07.2017; (c) www.hochwasserzentralen.de.

Btreibt man die Gefährdungsabschätzung retrospektiv mit beobachteten Niederschlagsdaten (Hindcast), so ändert sich das Bild insofern, dass vor allem für West- und Nordsachsen keine erhöhte Gefährdung ausgewiesen wird (Abbildung 12.4.30, unten). Für Ostachsen bleibt aber die grundsätzliche Abschätzung im Vergleich zur Prognose unverändert. Hier zeigt sich (wie auch bereits für den Zeitraum 10. bis 12.07.2017) die Problematik einer leicht zu sensiblen Reaktion des verwendeten Bewertungsverfahrens bei wiederholt nacheinander auftretenden, intensiveren Niederschlagsinputs, die für sich allein genommen aber zu noch keiner signifikanten Erhöhung der abgeschätzten Gefährdungsklasse beitragen. Nichtsdestotrotz wäre im vorliegenden Fall die Prognose (wenn auch falsch) im Sinne der Risikokommunikation nicht als hinderlich einzustufen, da durchaus – auch mit Blick auf Sachsen – die Wahrscheinlichkeit lokaler Überflutungen – gegeben war, was u. a. die vom DWD in besagtem Zeitraum herausgegebenen amtlichen Warnungen vor Starkregen belegen.

### 01./02.08.2017 – Starkregen in Ostachsen

Ein recht ausgeprägtes Tief mit dem Zentrum über der Ukraine und ein Tief über der Irischen See bewirkten das Einströmen heiß-schwüler Luft aus Nordafrika nach Mitteleuropa. Es stellte sich mit Blick auf Deutschland eine scharfe Luftmassengrenze in einer Linie vom Saarland bis

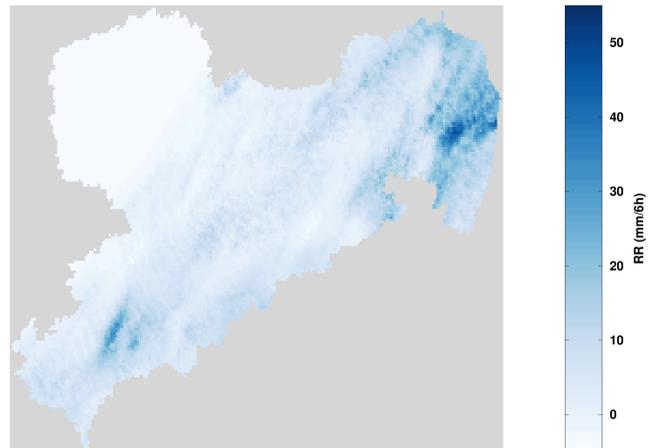


**Abbildung 12.4.30:** Frühwarn-Ampelkarten (Prognose und Hindcast) für den Vorhersagezeitpunkt 26.07.2017, 08:00 Uhr MESZ; oben: Prognose (QPE: RADOLAN-RW, QPF: COSMO-DE, 00:00-UTC-Lauf), unten: Hindcast (diagnostisch-retrospektive Betrachtung ausschließlich mit nunmehr bekanntem RADOLAN-QPE).

Frankfurt/Oder ein. Im Bereich südlich dieser Luftmassengrenze waren teilweise neue Augustrekorde der Lufttemperatur (jenseits der 35 Grad) zu verzeichnen.

Im Übergangsbereich der feucht-milden Luftmasse im Norden und der heißen und feuchten Luft im Süden waren alle Zutaten für starke Konvektion und den damit verbundenen unwetterträchtigen Begleiterscheinungen wie Starkregen, Hagel und Böen bis hinein in den Orkanbereich gegeben. Diese Entwicklung setzte im Tagesverlauf des 01.08. im Südwesten Deutschlands ein und verlagerte sich dann nach und nach nordwärts; am Abend bzw. in der Nacht zum 02.08. war dann vor allem der Osten Sachsens betroffen (siehe Abbildung 12.4.31). Dort traten Starkregenmengen von mehr als 35 mm in 6 h auf.

Obschon die NWP zunächst einige Probleme hatte die Entwicklung konsistent abzubilden, lagen spätestens



**Abbildung 12.4.31:** Aus RADOLAN-RW gebildete 06-h-Summe bis 02.08.2017, 02:50 Uhr MESZ.

mit den 15-UTC-Läufen (17:00 Uhr MESZ)<sup>1</sup> von COSMO-DE bzw. COSMO-DE-EPS konsistente Lösungen vor, die die Entwicklung des Abends und der Nacht für Sachsen gut prognostizierten, was der Vergleich der Frühwarn-Prognose (Abbildung 12.4.32, oben) mit dem Hindcast (Abb. 12.4.32, unten) illustriert. Die so erzielte Vorwarnzeit bewegt sich hier also in der Größenordnung von 4 bis 6 Stunden, was mit Blick auf die hochdynamische Wetterentwicklung ein sehr guter Befund ist.

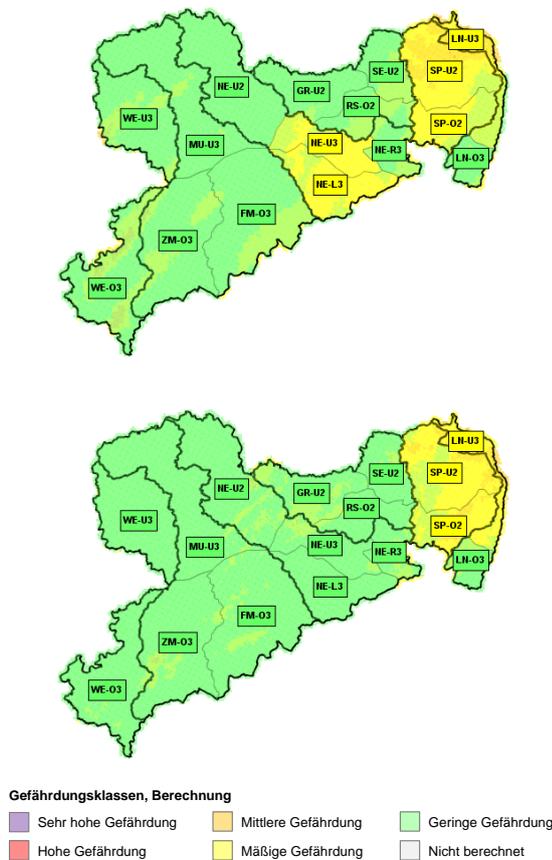
Hydrologisch war vor allem im Gebiet der Schöps teilweise in kleineren Gewässern eine Wasserführung bis in der Bereich des MHQ<sup>2</sup> zu beobachten (z. B. Pegel Jänkendorf 1/Schwarzer Schöps), allerdings gab es keine Richtwertüberschreitungen an den Meldepegeln. Das zeigt einmal mehr die Schwierigkeit der Verifikation von Frühwarn-Prognosen anhand von Pegelmessungen und unterstreicht erneut, dass das Frühwarnprodukt mit seinen Gefährdungsstufen nicht direkt auf die im Pegelmessnetz erwartbare Ereigniskulisse bezogen werden kann.

## 10./11.08.2017 – Starkregen in Ost-, West- und Nordsachsen

Auf der Ostseite eines vom Balkan über Polen nach Norden ziehenden kleinräumigen Tiefdruckkerns kam es zum Einstrom feuchtwarm-labiler Luftmassen; auf der Westseite hingegen wurde kühle maritime Luft herangeführt. Im

<sup>1</sup> In der Regel ca. anderthalb bis zwei Stunden nach Vorhersagezeitpunkt verfügbar.

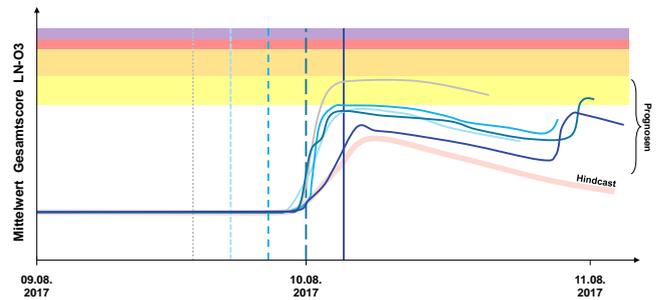
<sup>2</sup> MHQ ist der an einem bestimmten bepegelten Querschnitt aus einer langen Beobachtungsreihe ermittelte mittlere Hochwasserdurchfluss.



**Abbildung 12.4.32:** Frühwarn-Ampelkarten (Prognose und Hindcast) für den 01./02.08.2017; oben: Prognose, Vorhersagezeitpunkt 18:00 Uhr MESZ (QPE: RADOLAN-RW, QPF: COSMO-DE, 15:00-UTC-Lauf), unten: Hindcast (diagnostisch-retrospektive Betrachtung ausschließlich mit nunmehr bekanntem RADOLAN-QPE), Vorhersagezeitpunkt 01.08.2017 08:00 Uhr MESZ.

Bereich der Luftmassenkonvergenz bildeten sich verbreitet ergiebige Niederschläge, welche gebietsweise unwetterartig ausfielen (Gewitter, Starkregen, Hagel).

Die Niederschläge fielen in zwei Episoden, jeweils in der Nacht vom 09. auf den 10.08. und dann am Abend/Nacht des 10.08. In der ersten Episode war vor allem Ostsachsen (Schwarze Elster, Klosterwasser, Hoyerswerdaer Schwarzwasser), in der zweiten dann West- und später Nordsachsen betroffen (Pleiße und Parthe). Die aufgetretenen Niederschlagsmengen (Abb. 12.4.34) bewegten sich dabei gebietsweise oberhalb von 40 mm in kurzer Zeit (z. B. 40 mm in weniger als einer Stunde in der Nacht vom 09. auf den 10.08. an der Station Weißenberg in der Oberlausitz). In 24 h kamen vor allem in Nordsachsen gebietsweise mehr als 50 mm zusammen.

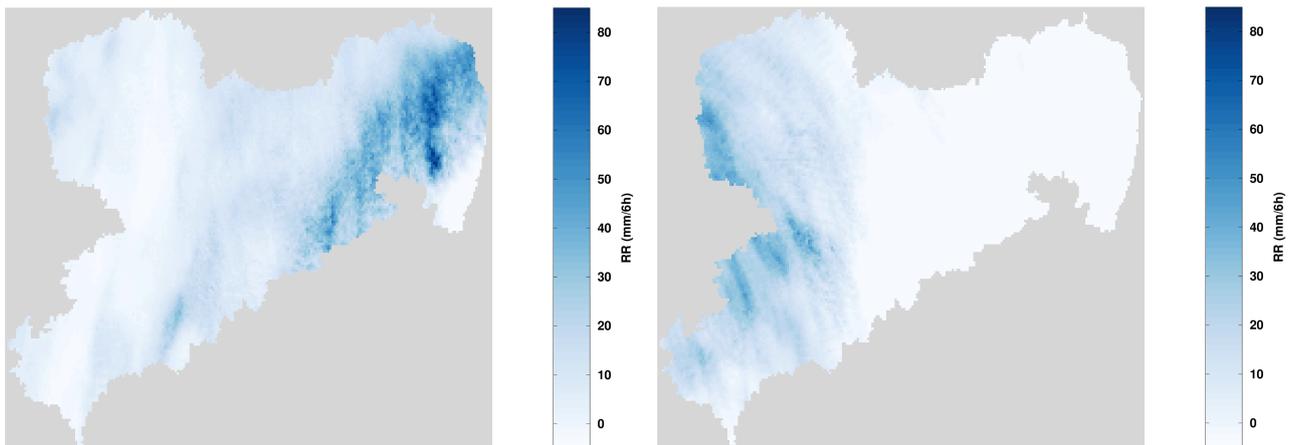


**Abbildung 12.4.33:** Mittelwert des prognostizierten mittleren Gesamtscoreverlaufs für das im betrachteten Zeitraum *nicht* durch Hochwasser betroffene Vorhersagegebiet LN-O3 (Lausitzer Neißer oberhalb 300 m ü. NN) für fortlaufende Vorhersagezeitpunkte vom 09.08. 15:00 Uhr MESZ bis 10.08.2017 03:00 Uhr MESZ mit 3-h-Updates: Beispiel für konsistent richtig-negative Prognosen nach einzelner falsch-positiver Prognose (Verbesserung der Prognosegüte mit Herannahen des Ereignisses). Die unterschiedlichen Vorhersagezeitpunkte sind durch die vertikalen Linien dargestellt. Als Referenz ist der Verlauf des Gesamtscores aus dem Hindcast dargestellt; Output des Frühwarnverfahrens zur Darstellung mittels Splines geglättet. Die den eingefärbten Gefährdungsstufen zugrunde liegenden Untergrenzen korrespondieren zu Tabelle 11.3.1. Für die Ableitung gebietsweiser Gefährdungsstufen (WARNSIM-Methodik) ist nicht ausschließlich der Mittelwert des Gesamtscores relevant (vergleiche Tab. 11.3.2).

Nach zunächst noch größeren Unsicherheiten in der Niederschlagsvorhersage, bildete sich ab den 12-UTC-Läufen des 09.08.2017 eine relativ gute Konsistenz bei den typischen NWP-Produkten sowie innerhalb der Vorhersage-Ensembles (beispielsweise bei COSMO-DE-EPS) aus. Somit konnte auch das Frühwarnverfahren die Lokalisierung und Magnitude der eintretenden Hochwassersituation gut prognostizieren (siehe Abbildung 12.4.33 sowie linke Spalte der Abb. 12.4.35).

Die Prognosegüte für den 11.08.2017 (Prognose erstellt am 10.08.) ist ebenfalls als gut einzustufen; die nun in den Fokus gelangenden Flussgebiete der Oberen sowie Unteren Weißen Elster sind mit einer realistischen Abschätzung der Gefährdung („mäßig“) belegt (Abbildung 12.4.35, oben rechts). Einzig im Bereich des Spreegebiets kam es zu einer größeren Überschätzung auf Grund zu starker Niederschlagssignale in der als Antrieb verwendeten COSMO-DE-QPF.

Der Hindcast für den 10.08. (Abbildung 12.4.35, Mitte links) zeigt für den Bereich Obere Schwarze Elster zwar richtig verortete Signale/Pixel für die Ausweisung einer mäßigen Gefährdung, allerdings reichen diese gemäß der zugrunde liegenden Aggregierungsmethodik (WARNSIM) nicht aus, um die Gefährdungslage der Gebietes RS-O2



**Abbildung 12.4.34:** Aus RADOLAN-RW gebildete 6-stündige Radar-QPEs für Sachsen; links: 10.08. (gebildet bis 04:50 Uhr MESZ), rechts: 11.08.2017 (gebildet bis 01:50 Uhr MESZ).

entsprechend flächenhaft anzuheben. Selbiges trifft zu für den Hindcast vom 11.08. für den Bereich Weiße Elster/Pleiße, Gebiet WE-O3 (Abbildung 12.4.35, Mitte rechts). Hier zeigt sich ein Nachteil solch einer räumlichen Aggregation von Modellergebnissen, wobei die Vorteile im operationellen Prognosebetrieb sicher überwiegen (vergleiche dazu Abschnitt 10.4).

Die Warnsignale in Ostsachsen sowie im Bereich der Sächsischen Schweiz/Obere Elbe stammen gewissermaßen noch vom Vortag und rühren daher, dass stärkere Niederschlagssignale tendenziell einige Zeit die Gefährdungsabschätzung beeinflussen („Trägheit“ der Frühwarnung), was ja methodisch explizit so gewollt ist (vergleiche Abschnitt 11.3.5).

## 12.5 Öffentlichkeitsarbeit

Die Öffentlichkeitsarbeit (ÖA) im Rahmen des Projekts adressierte zwei Zielgruppen: die breite Öffentlichkeit sowie das Fachpublikum. Vor/zur/nach der Erstveröffentlichung von Hochwasserfrühwarnprodukten über das LHWZ-Webportal (siehe Abschnitt 12.2), wurden/werden unterschiedliche ÖA-Aktivitäten durchgeführt (siehe Tabelle 12.5.1). Diese sollen hier kurz vorgestellt werden.

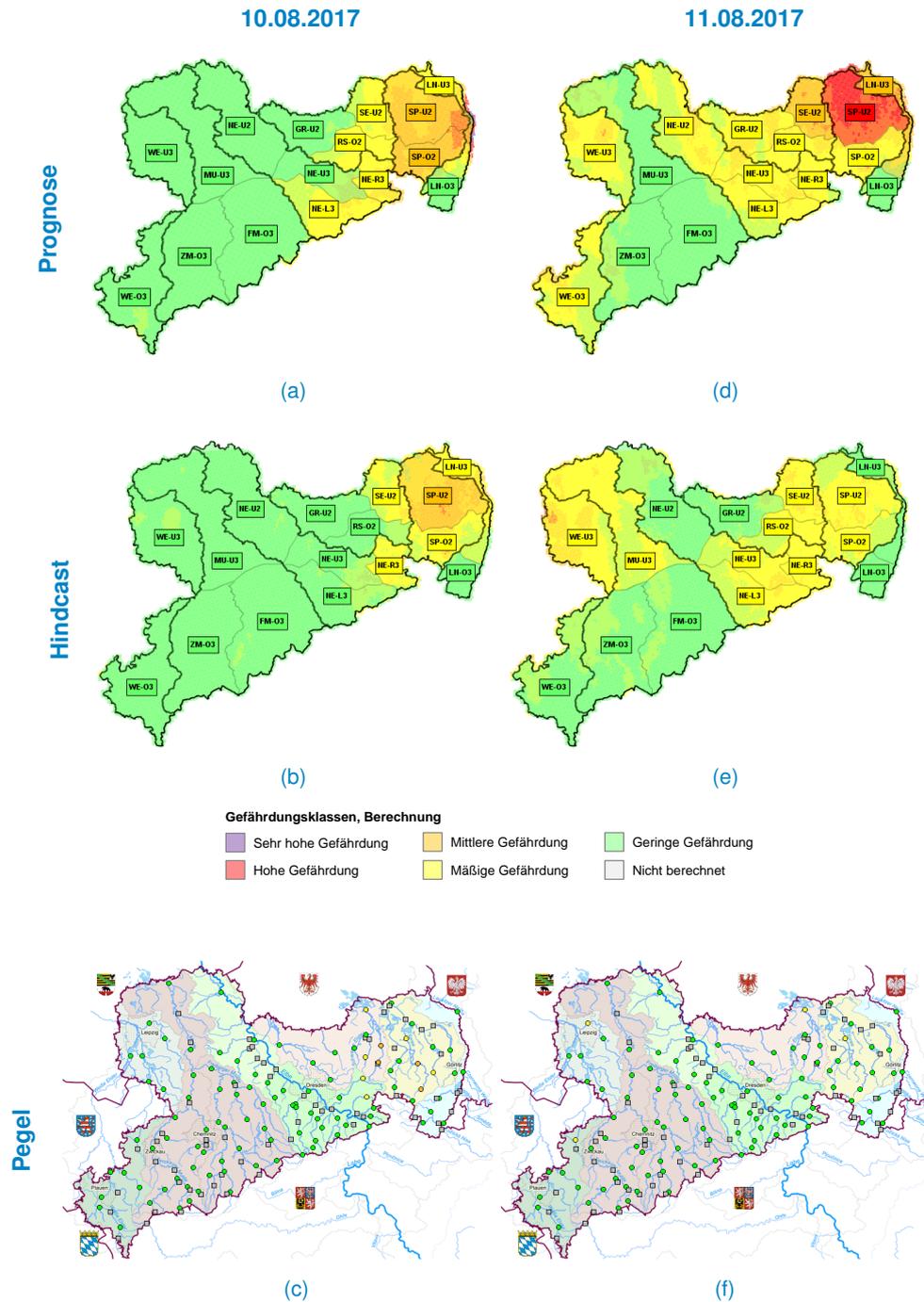
### 12.5.1 Produkte für die Öffentlichkeit

Vor der Erstveröffentlichung von Frühwarnprodukten gab es nur in geringfügigem Maße ÖA-Aktivitäten. Zu nennen sind hier ein Beitrag im LfULG-Newsletter über Inhalt und Sachstand des Projektes sowie eine knappe Projektvorstellung

innerhalb eines vom Mitteldeutschen Rundfunk produzierten und im März 2017 ausgestrahlten Radiofeatures über die Arbeit des LHWZ.

ÖA-seitig wird die eigentliche Erstveröffentlichung („Stapellauf“) mit verschiedenen Produkten unterstützt und flankiert, beispielsweise Beiträge in der Tagespresse (via Pressemitteilung des LfULG). Weiterhin ist zum Redaktionsschluss des vorliegenden Berichts ein Info-Flyer in Arbeit (siehe Abbildung 12.5.1). Immer größerer Bedeutung kommt der Nutzung von Social Media bei der ÖA zu; diese Kanäle werden daher im ÖA-Konzept mit berücksichtigt. Als niederschweligen Einstieg für potentielle Nutzer wird ein kurzer Erklärfilm konzipiert und durch Dritte umgesetzt, welcher auch und vor allem via Social Media verteilt wird (Abbildung 12.5.2). Die darin vermittelten Kernbotschaften sind: (1) Was kann das neue Produkt? (2) Was ist der Unterschied zwischen Frühwarnung und pegelbezogenen Warnungen/Vorhersagen? (3) Wo ist das Produkt zu finden? (4) Wie ist das Produkt zu benutzen (Bedeutung, wenn Gefährdung besteht)?

Auch nach erfolgter Erstveröffentlichung muss – im Sinne der Informationsvorsorge – in geeigneter Weise auf die Verfügbarkeit von Frühwarnprodukten sowie deren Bedeutung hingewiesen werden. Auch hier sollten die Social-Media-Kanäle genutzt werden und bei einer bestehenden aktuellen Gefährdungslage auf das Produkt hingewiesen werden. Eine Möglichkeit dies zu tun ergibt sich aus der Verfügbarkeit von RSS-Feeds der Frühwarnung (siehe Abschnitt 12.2), welche bruchfrei und komfortabel beispielsweise in automatische Twitter-Posts umgewandelt werden



**Abbildung 12.4.35:** Frühwarn-Ampelkarten und Warnstatus für das Ereignis 10./11.08.2017; linke Spalte: 10.08.2017, rechte Spalte: 11.08.2017; obere Zeile: Prognosen (QPE: RADOLAN-RW, QPF: COSMO-DE), mittlere Zeile: Hindcasts (diagnostisch-retrospektive Betrachtung ausschließlich mit nunmehr bekanntem RADOLAN-QPE), untere Zeile: beobachteter Warnstatus an den Meldepegeln.

(a + b) Vorhersagezeitpunkt: 09.08., 18:00 Uhr MESZ, QPE: RADOLAN-RW, QPF: COSMO-DE (15:00-UTC-Lauf).

(d + e) Vorhersagezeitpunkt: 10.08., 18:00 Uhr MESZ, QPE: RADOLAN-RW, QPF: COSMO-DE (15:00-UTC-Lauf).

(c) Übersicht maximaler Warnstatus an den sächsischen Hochwassermeldepegeln für den 10.08.2017.

(f) Übersicht maximaler Warnstatus an den sächsischen Hochwassermeldepegeln für den 11.08.2017.

**Tabelle 12.5.1:** Konzept zur Öffentlichkeitsarbeit: Produkte der Öffentlichkeitsarbeit nach Phasen der Veröffentlichung von Frühwarnprodukten.

Phase	Produkte für die Öffentlichkeit	Produkte für das Fachpublikum
Vor Veröffentlichung	LfULG-Newsletter, Radiofeature MDR	Fachpublikationen und Fachvorträge; DWD-Newsletter Hydrometeorologie, Projektstagebuch*
Veröffentlichung	Tagespresse§ Social-Media-Kanäle des LfULG, SMUL und evtl. des Freistaats; Erklärfilm# Info-Flyer	Information in die Runde des LHP§ sowie des DWD, Projektstagebuch
Nach Veröffentlichung	Social-Media-Kanäle des LfULG, Erklärfilm, Info-Flyer	Fachpublikationen, Fachvorträge, Projektstagebuch, Projektendbericht

§ Via Pressemitteilung der Öffentlichkeitsarbeit des LfULG; \* Twitter und Facebook; # Erklärfilm wird via Social Media, als auch via LHWZ-Webauftritt angeboten; ~ Siehe Anhang; + <https://www.researchgate.net/project/Development-and-implementation-of-a-flash-flood-early-warning-system-for-Saxony-Germany>; § Länderübergreifendes Hochwasserportal – ein Forum der Hochwasservorhersagezentralen in Deutschland.

können.<sup>1</sup> Für die Informationsweitergabe würde sich der bereits bestehende Twitter-Kanal des LfULG (@LfULG) anbieten oder es könnte gegebenenfalls ein dedizierter LHWZ-Kanal geschaffen werden.

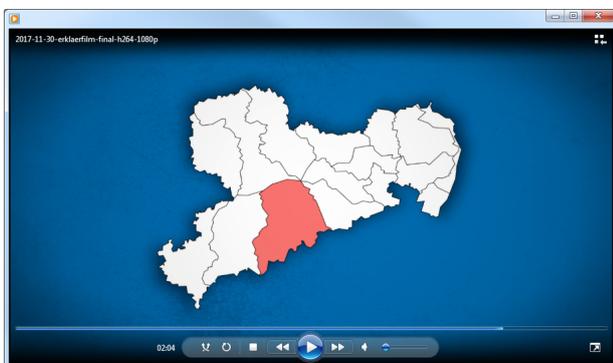
### 12.5.2 Produkte für das Fachpublikum

Der Austausch mit dem Fachpublikum ist vor allem während der Entwicklung des Hochwasserfrühwarnsystems von großer Bedeutung gewesen. Dieser Austausch wurde durch diverse Aktivitäten und Produkte unterstützt, beispielsweise projektbezogene Veröffentlichungen oder Vorträge auf Fachveranstaltungen (siehe entsprechenden Anhang auf Seite 198). Weiterhin wird seit Juni 2016 ein Projektstagebuch auf ResearchGate<sup>2</sup> geführt und regelmäßig fortgeschrieben. Schließlich kann hoffentlich der vorliegende Projektendbericht anderen als Blaupause oder zumindest als Zusatzinformation auf dem Weg hin zu einem operationellen Hochwasserfrühwarnsystem dienen.

**Schlussfolgerung 38:** Eine konzeptionell untersetzte Öffentlichkeitsarbeit hat im Sinne der Informationsvorsorge eine große Bedeutung; nur so kann der breiten Öffentlichkeit die Verfügbarkeit, Erreichbarkeit und Bedeutung von Hochwasserfrühwarnprodukten vermittelt werden. ❖



**Abbildung 12.5.1:** Entwurf eines Info-Flyers zum Hochwasserfrühwarnprodukt für die Öffentlichkeitsarbeit (Mock-Up).



**Abbildung 12.5.2:** Szene aus dem Erklärfilm zur Hochwasserfrühwarnung (Film abrufbar via YouTube).

<sup>1</sup> Hierfür gibt es auch diverse Dienste im Web (z. B. Twibble oder Dlvrit).

<sup>2</sup> Ein soziales Netzwerk für Forschung und Forscher. Tagebuch unter: <https://www.researchgate.net/project/Development-and-implementation-of-a-flash-flood-early-warning-system-for-Saxony-Germany>.

## 12.6 Diskussion

Die Erstellung und Verwaltung sowie potentiell die Verteilung der eigentlichen Warnprodukte (beispielsweise Warnkarten) wurde in HWIMS<sup>1</sup> umgesetzt. Diese Lösung ist auch dahingehend flexibel, dass zukünftig realisierbar wäre, Hochwasserfrühwarnprodukte aktiv im Sinne des amtlichen Hochwassernachrichten- und Alarmdienstes zu verteilen. Aktuell wird die Hochwasserfrühwarnung ausschließlich via des LHWZ-Webportals veröffentlicht.

Die Verifikation des operationellen Prototyps für das erste Betriebsjahr sowie eine Reihe von Fallstudien bestätigen das bereits im Rahmen der Vorstudien gezeichnete Bild, dass einfache, klassifizierende Bewertungsverfahren zur Abschätzung der Hochwasserneigung einen deutlichen prädiktiven Nutzen bei gleichzeitig robuster regionaler Gültigkeit liefern können. Nichtsdestotrotz ist auch anhand dieser empirischen Befunde erneut hervorzuheben, dass vor allem für sehr kleinräumige und gleichzeitig sehr intensive Ereignisse – also jene, welche im Sinne der Hochwasserfrühwarnung für kleine Einzugsgebiete relevant sind! – die Güte hydrologischer Vorhersagen/Prognosen aufgrund der Unsicherheiten in der quantitativen Niederschlagsvorhersage eingeschränkt sein muss.

Obschon die bisher mit dem Frühwarnsystem gesammelten Erfahrungen sehr positiv sind, muss für eine fundierte Bewertung/Verifikation von Frühwarnprodukten in der Praxis und gegebenenfalls Anpassung/Verbesserung des zugrunde liegenden Verfahrens erst ein zeitlich umfassender, empirischer Datenbestand vorhanden sein. Seit Operationalisierung des Frühwarnsystems war bisher auch maximal eine mittlere Gefährdungslage zu beobachten, sodass auch hinsichtlich der Bewertung für größere Ereignisse noch Daten fehlen. Von großem Wert für die fortlaufende Kontrolle des Frühwarnverfahrens ist die Möglichkeit zum Hindcasting; nur so ist eine (retrospektive) Abtrennung von Unsicherheiten in den Niederschlagsvorhersagen von Unsicherheiten bzw. Unzulänglichkeiten bei der Frühwarn-Methodik verlässlich möglich.

---

<sup>1</sup> Hochwasserinformations- und -managementsystem des LHWZ.

## 13 Zusammenfassung Teil III

Aufbauend auf einer Synthese der aus den Voruntersuchungen gewonnenen Erkenntnisse, wurde ein Hochwasserfrühwarnsystem für Sachsen konzipiert, implementiert und operationalisiert. Dabei wurden die beiden Bestandsysteme KALYPSO und HWIMS berücksichtigt, sodass sich das neue Hochwasserfrühwarnsystem nahtlos in die bestehende Systemlandschaft des LHWZ einfügt. Die Basisinformationen der Frühwarnung werden dabei durch ein in KALYPSO operationalisiertes Bewertungsverfahren der aktuellen Hochwassergefahr (Hochwassergefährdung) bereitgestellt, was eine Holschuld<sup>1</sup> der Nutzer bedeutet.

Im bisherigen Betrieb zeigte das Frühwarnsystem seit März 2016 einen deutlichen Mehrwert gegenüber dem Fall „keine Hochwasserfrühwarnung verfügbar“ auf, was durch Fallstudien weitgehend belegt werden konnte. Allerdings traten auch Fälle auf, wo das Hochwasserfrühwarnsystem insofern versagte, dass aufgetretene, insbesondere kleinräumige Ereignisse in Folge von Starkregen nicht gut prognostiziert werden konnten. Die Ursache war hier die Unsicherheit in der Niederschlagsvorhersage. Der Fall „Falschalarm“ war hingegen deutlich seltener zu verzeichnen, kam aber ebenfalls vor.

Als wichtiger Bestandteil bei der Umsetzung des Frühwarnsystems wurde im Projekt auch die begleitende Öffentlichkeitsarbeit vorgesehen. Sowohl vor, als dann natürlich zur Erstveröffentlichung von Ampelkarten, wurden potentielle Nutzer über die Verfügbarkeit dieses neuen Produkts sowie dessen Anwendungsbereiche und Aussagekraft entsprechend informiert. Dabei wurde besonderer Wert auf die Nutzung von Social Media als Kommunikationskanal gelegt.

---

<sup>1</sup>Wikipedia: <https://de.wikipedia.org/wiki/Holschuld> (abgerufen am 13.07.2017): „Holschuld bezeichnet im Informationsmanagement die Verantwortung desjenigen, der eine Information benötigt, diese vom Inhaber der Information rechtzeitig und umfassend und in geeigneter Form abzuholen.“

## Teil IV

# Ausblick und Gesamtzusammenfassung

## 14 Zukünftiges Verbesserungspotential bei der regionalen Hochwasserfrühwarnung

Das Frühwarnsystem konnte anforderungsgemäß umgesetzt werden und erfüllt seine Bestimmung der operativen Bereitstellung von Hochwasserfrühwarnprodukten. Natürlich gibt es Potential für Verbesserungen hinsichtlich der Veröffentlichung und Verteilung von Warnprodukten, der fachlich der Frühwarnung zugrunde liegenden Methodik sowie nicht zuletzt hinsichtlich der Nutzer- bzw. Risikokommunikation. Die angesprochenen Punkte sollen in diesem Kapitel angesprochen werden, allerdings ohne den Anspruch auf eine erschöpfende Darstellung und Diskussion.

### 14.1 Veröffentlichung und Verteilung von Warnprodukten, Schnittstellen

Wie bereits hierin ausgeführt (siehe Abschnitte 11.4 und 12.2), ist die aktuell operationell für Sachsen via Internet bereitgestellte Hochwasserfrühwarnung kein Produkt im engeren Sinne der Hochwassernachrichten- und Alarmdienstverordnung (HWNADO, 2015) sowie der Hochwassermeldeordnung (HWMO, 2015). Allerdings erlaubt die technische Konzeption und Umsetzung des Frühwarnsystems (siehe Kapitel 11) durch die enge und konsequente Anbindung an HWIMS durchaus eine direkte (optional bestätigungspflichtige) Übermittlung von Frühwarnprodukten an Teilnehmer des Hochwassernachrichtendienstes. Und zwar unabhängig von der Verfügbarkeit des Internets via Nutzung von Kanälen wie SMS, Sprachansager oder Fax. Wenn überhaupt wären hierzu an HWIMS nur geringfügige Änderungen notwendig.

Ein zweiter Punkt ist die Bereitstellung von Frühwarninformationen via standardisierter Schnittstellen, beispielsweise zur Erzeugung weiterer Produkte durch Dritte. Ein Beispiel ist die geplante Erweiterung der Smartphone-Apps des Länderübergreifenden Hochwasserportals (LHP) sowie des DWD (WarnWetter) um eine „Frühwarn-Ansicht“. Derzeitig wird in den besagten Apps lediglich der aktuelle,

pegelbeobachtungsbasierte Warnstatus der Bundesländer ausgegeben. Hier zeigt sich auch ein gewisses Dilemma; während Wetterwarnungen vor allem prognostisch sind, also in die Zukunft weisen, so sind Hochwasserwarnungen<sup>1</sup> in Deutschland oft rein beobachtungsbasiert, beispielsweise erstellt anhand von Überschreitungen von bestimmten Richtwerten an Hochwassermeldepegeln. Durch eine koordinierte Bereitstellung und Weitergabe von Hochwasserfrühwarnungen („Vorabinformation Hochwasser“) durch die Bundesländer könnte man diesem Problem begegnen und so die weite Verbreitung der genannten Apps im Sinne der Informationsvorsorge gezielt nutzen. Die technischen Voraussetzungen wären auch hierfür mit der aktuellen Umsetzung des Frühwarnsystems sowie mit Blick auf HWIMS bereits gegeben.

**Schlussfolgerung 39:** *Die umgesetzte IT-Lösung für das Frühwarnsystem erlaubt prinzipiell eine Verteilung von Produkten zur Hochwasserfrühwarnung aktiv an Informationsempfänger im Sinne von HWNAVO/HWMO. Es sollte fachpolitisch geklärt und festgelegt werden, ob das beabsichtigt ist, oder nicht.* ❖

### 14.2 Einbeziehung von Unsicherheiten bei der Hochwasserfrühwarnung

Mittels der Verifikationsstudie (Kapitel 7) wurde der Mehrwert probabilistischer QPFs gegenüber deterministischen Produkten herausgestellt. Generell ist das Ableiten der prädiktiven Unsicherheit im Bezug auf eine Kontinuums-simulation/Vorhersage, beispielsweise des Durchflusses (Anwendungsfall Ganglinienvorhersage; vergleiche Kapitel 8), mehr oder weniger geradlinig möglich. Hier spielt

<sup>1</sup>Hier ist explizit nicht das durch die HWNAVO/HWMO definierte LHWZ-Produkt gemeint („Lagebericht“).

besonders die statistische Nachbearbeitung der Modellergebnisse eine wichtige Rolle (siehe Abschnitt 2.5). Für den Anwendungsfall Frühwarnung werden aber oftmals räumliche und/oder zeitliche Aggregationen vorgenommen; für das sächsische Frühwarnsystem (Abschnitt 11) beispielsweise ist für die Ermittlung einer Gefährdungsklasse der maximale prognostizierte Modelloutput innerhalb des gesamten Vorhersagezeitraums an einem Modellpunkt (Pixel) relevant. Ferner werden die so gewonnenen pixelweisen Informationen dann mit einer Vorschrift zu Flächenaussagen aggregiert.

Aufgrund dieses Vorgehens würde eine wie in Abschnitt 2.5 beschriebene „klassische“ Unsicherheitsverarbeitung bei einer auf Bewertungsverfahren (FSAPs) beruhenden Hochwasserfrühwarnung keinen Sinn ergeben. Vielmehr erscheint es zweckmäßig, QPF-Ensembles vorzuprozessieren oder entsprechende, bereits vorhandene Produkte zu nutzen. Beispielsweise aggregiert der DWD aus dem COSMO-DE-EPS-Output Schwellenwertkarten für verschiedene Andauern, Eintrittswahrscheinlichkeiten sowie Niederschlagsschwellenwerte (siehe Abbildung 2.7.1). Die Herausforderung dabei ist, die im Sinne der Nutzer von Frühwarnprodukten relevanten Eintrittswahrscheinlichkeiten zu selektieren; zweckmäßig wäre hier sicher eine Orientierung an verbalen Kategorien wie „kommt hoch wahrscheinlich“, „kommt wahrscheinlich“, „Worst-Case“ (im Sinne von sehr selten/extrem). Mögliche Eintrittswahrscheinlichkeiten wären beispielsweise 90, 50 und 10 %.

Die zu diesen Wahrscheinlichkeiten korrespondierenden QPF-Schwellenwertkarten aus COSMO-DE-EPS könnten prinzipiell der für Sachsen nun etablierten Frühwarnmethodik zugeführt werden und es würden auf diesem Wege gewissermaßen drei – zu den bereits genannten verbalen Kategorien korrespondierende – Ampelkarten bzw. drei Kartenebenen entstehen. Technisch wäre das mit der nun vorliegenden IT-Lösung machbar; die COSMO-DE-EPS-Schwellenwertkarten werden durch den DWD operationell zur Verfügung gestellt. Aber auch hier stellt sich – wie bereits in Zusammenhang mit der ganglinienorientierten Unsicherheitsverarbeitung diskutiert – die Frage, ob und wie die Nutzer gewillt und im Stande sind, auf

Basis dieser Informationen bessere Entscheidungen<sup>1</sup> zu treffen (TODINI, 2017). Unabhängig vom gerade Gesagten wird aktuell (Ende 2017) in einer ersten fachlichen Erweiterung des operationellen Hochwasserfrühwarnsystems das COSMO-DE-EPS-Produkt integriert und zu drei neuen Inputgrids (90, 50 und 10er-Perzentil) aggregiert.

Gewissermaßen ein ähnliches, aggregiertes probabilistisches Produkt stellt die Quantilvorhersage der DWD-RWB Leipzig dar (siehe Abschnitt 6). Diese quantitative Niederschlagsvorhersage enthält flächenhaft und zeitlich aggregierte Niederschlagsvorhersagen für drei Eintrittswahrscheinlichkeiten (90, 50 und 10 %). Diese Quantilvorhersage-QPF ist im Set der operationell für die Hochwasserfrühwarnung zur Verfügung stehenden Antriebsdaten mit enthalten (siehe Abschnitt 11.3.4). Somit ist zumindest eine pseudo-probabilistische Frühwarnung möglich.

Zum Themenkomplex *Konzeption eines probabilistischen Frühwarnprodukts sowie Schulung und Training von Nutzern* hat das LfULG/LHWZ aktuell (Ende 2017) einen Projektvollantrag für die BMBF-Fördermaßnahme „Anwender-Innovativ: Forschung für die zivile Sicherheit“ (Akronym „HoWa-innovativ“) als Verbundkoordinator gemeinsam mit Verbundpartnern von Uni Augsburg (Lehrstuhl regionales Klima und Hydrologie) sowie TU Dresden (Lehrstuhl Hydrologie) eingereicht.

**Schlussfolgerung 40:** *Die Einbeziehung von Unsicherheiten bei der Hochwasserfrühwarnung ist grundsätzlich möglich und würde theoretisch auch einen prädiktiven Mehrwert bedeuten. Allerdings stellt sich hier die Frage nach Bereitschaft und Befähigung der Nutzer von Frühwarnungen, probabilistische Produkte für die Risikobewertung effizient zu nutzen. Nutzerseitig besteht ein Bedarf nach Schulung und Training im Umgang mit Unsicherheiten, sollen probabilistische Vorhersageprodukte ihren Mehrwert voll entfalten.* ❖

<sup>1</sup> Um bessere Entscheidungen treffen zu können, muss man zunächst wissen, wie gut eine bestimmte Entscheidung ist. Dazu muss man den Nutzen einer Vorhersage quantifizieren können. Das erfordert wiederum, dass die Kosten für diverse Strategien im Umgang mit Vorhersagen bekannt sind, beispielsweise für den Fall, dass auf Grund einer Vorhersage ein (Kosten verursachender) Einsatz erfolgt, ohne dass ein Ereignis eintritt oder aber – was viel schwieriger zu quantifizieren ist – für die Fälle Ereignisbewältigung ohne bzw. mit entsprechender Vorlaufzeit durch eine gute Vorhersage. Diese Abwägungen müssen von den tatsächlichen Akteuren (z. B. den Kommunen) angestellt werden. Hier besteht also ganz wesentlicher Bedarf nach Schulung und Training im Umgang mit Unsicherheiten, sollen probabilistische Vorhersageprodukte ihren Mehrwert voll entfalten.



Abbildung 14.3.1: Informationstafel des CrowdHydrology-Projekts zum Ablesen und Zumelden von Pegelbeobachtungen; (c) Dr. Christopher S. Lowry (mit freundlicher Genehmigung des Urhebers).

### 14.3 Einbeziehung von Crowdsourcing-Daten

Ogleich nicht eindeutig definiert, meint Crowdsourcing die Philosophie viele, eher ungenaue Daten zu erheben und zu integrieren und dadurch ein stimmiges Gesamtbild zu erhalten.<sup>1</sup> Der Begriff Crowdsourcing orientiert im engeren Sinne eher darauf, dass traditionell durch besonderes Personal erhobene Daten nunmehr kostenlos oder -arm durch Laien erhoben werden. Im weiteren Sinne versteht man aber darunter auch das Erheben von Daten, welches mit konventionellen Methoden sonst schlichtweg nicht möglich wäre. Eng verknüpft damit ist der Begriff der Citizen Science, wobei es um die Einbeziehung von Laien – unter anderem bei der Datenerhebung – geht. Das Paradigma dabei ist generell, dass viele, potentiell ungenaue Daten besser sind, als wenige genaue, oder eventuell gar keine Daten. Weiterhin werden auf diesem Wege die Bekanntheit und Akzeptanz von wissenschaftlichen Projekten gesteigert, da sich die Bürger als wichtig für das Gelingen eines Projekts wahrnehmen können.

So findet man im Bereich der Hydrologie Anwendungen mit dem Ziel, Laien als Pegelbeobachter einzusetzen (siehe z. B. LOWRY & FIENEN, 2013; Abbildung 14.3.1). Beispiele sind hier das CrowdHydrology-Projekt<sup>2</sup> der Universität Buffalo sowie das CrowdWater-Projekt<sup>3</sup> der Universität Zürich, welche im Wesentlichen der Sammlung

<sup>1</sup> Dieses Phänomen wird auch als „Wisdom of Crowds“ („Weisheit der Masse“) bezeichnet.

<sup>2</sup> Siehe <http://www.crowdhydrology.com>

<sup>3</sup> Siehe <http://www.crowdwater.ch>

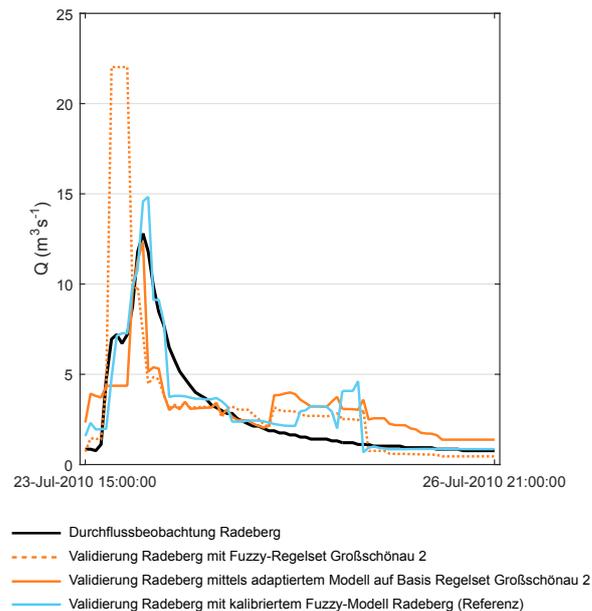


Abbildung 14.3.2: Verbesserung der Performance hydrologischer Modelle durch Einbeziehung von binären Nutzerrückmeldungen am Beispiel eines Fuzzy-Systems. Dargestellt ist ein Ereignis am Pegel Radeberg/Große Röder, welches jeweils nicht in die Kalibrierung der betrachteten Modelle eingegangen ist. Die schwarze Linie zeigt die Pegelbeobachtung, die orange strichlierte Linie ist die Simulation auf Basis eines „hart“ regionalisierten Modells (kalibriert für Pegel Großschönau 2/Mandau), die orange durchgezogene Linie ist der Output desselben Modells nach Anpassung auf Basis von Nutzerrückmeldungen mit der Methodik nach SAUER (2017) und schließlich blau ist die Simulation anhand eines für den Pegel Radeberg kalibrierten Fuzzy-Modells (betreffendes Ereignis nicht in Kalibrierdaten enthalten). Interessant ist, dass die Methodik nicht nur Potential bei der Regionalisierung/regionalen Übertragung von Modellen bietet, sondern offenbar auch im Stande ist, bereits kalibrierte Modelle adaptiv zu verbessern, was sich daran zeigt, dass – mit Blick auf die Güte der Scheitelvorhersage – mit dem adaptiven Modell gar bessere Ergebnisse erzielbar waren, als mit dem konkret für den Untersuchungspegel kalibrierten Modell. Abbildung verändert nach SAUER (2017).

von Wasserstand/Abfluss und Bodenfeuchte dienen. Eine weiteres interessantes Forschungsfeld ist das Einbeziehen von Daten für hydrologische Fragestellungen, welche ursprünglich für andere Zwecke erhoben wurden. Als Beispiele seien hier die Verwendung von Dämpfungsdaten kommerzieller Mobilfunk-Links („Handymasten“) oder aber Daten über das Intervall automatischer Scheibenwischer an Autos für die Verbesserung von Niederschlagsschätzungen (CHWALA & KUNSTMANN, 2016; RABIEI ET AL., 2013) genannt. Ein drittes, hochaktuelles Forschungsfeld adressiert die Frage, ob Crowdsourcing-Informationen da-

zu dienen können, die hydrologische Vorhersage und Warnung zu verbessern. Arbeiten wie MEERVELD ET AL. (2017) oder MAZZOLENI ET AL. (2017) demonstrieren, dass auch recht groben zurückgemeldeten Umweltbeobachtungen ein potentiell hoher Informationsgehalt mit Blick auf die Verbesserung hydrologischer Modelle innewohnen kann. Im Rahmen des hierin beschriebenen Gesamtprojekts wurde eine Masterarbeit vom LHWZ co-betreut, welche sich ebendieser Fragestellung widmete (SAUER, 2017).

Die Arbeit zeigte dabei auf, dass nutzerseitig zurückgemeldete Qualitätsaussagen bezüglich erhaltener Warnungen dazu dienen können, die Vorhersagegüte und die regionale Übertragbarkeit eines zugrunde liegenden hydrologischen Modells<sup>1</sup> zu verbessern (siehe Abbildung 14.3.2). Dabei waren einfache, schwellenwertbasierte Nutzerrückmeldungen („Tatsächliche Situation über/unter Prognose“) ausreichend, um eine signifikante Güteerhöhung erzielen zu können. Die Arbeit konzipiert damit prototypisch einen Workflow, um – vor allem mit Blick auf kleine, unbeobachtete Einzugsgebiete – hydrologische Modellsysteme im laufenden Betrieb adaptiv zu verbessern. Mit dem von SAUER (2017) vorgeschlagenen Vorgehen ließe sich also auch das aktuelle sächsische Hochwasserfrühwarnsystem (siehe Kapitel 11) im operationellen Einsatz weiter verbessern. Hierzu gibt es allerdings zwei Voraussetzungen, welche aktuell nicht erfüllt sind:

Erstens muss technisch gewährleistet sein, dass Nutzer leicht verständlich und komfortabel Rückmeldungen zu Vorhersagen/Prognosen/Warnungen geben können. Hierzu ist sicherlich das Smartphone mit einer geeigneten App das Mittel der Wahl. Solch eine App wäre dann zu konzipieren, zu erstellen, zu verteilen sowie zu pflegen. Auch sind angrenzende Belange wie Datenschutz etc. gegebenenfalls zu prüfen. Zweites ist es für das vorgeschlagene Vorgehen erforderlich, dass im statistischen Sinne ausreichend viele Nutzer Rückmeldungen bereitstellen. Es wäre zu prüfen, ob nicht eine bestehende und vor allem hinreichend weit verbreitete App-Lösung, wie beispielsweise die DWD-WarnWetter-App oder die App „MeinePegel“ des LHP, diese Voraussetzungen erfüllen kann. Mit Blick auf das Gesagte erscheint eine bundeslandspezifische Lösung an dieser Stelle als nicht zielführend. Darüber hinaus ist klar, dass nutzerseitig möglichst nur *eine* Anwendung für das Empfangen und Betrachten von Warnungen sowie

das optionale Rückmelden von Nutzerbeobachtungen zum Einsatz kommen sollte.

Wie bereits in Abschnitt 12.3 angeklungen, ist es weiterhin relativ schwierig, die Qualität von Hochwasserfrühwarnprodukten im Sinne einer Verifikation zu bewerten, da zunächst Informationen über die lokale Ereignisausprägung nicht vorliegen beziehungsweise sich solche Ereignisse nur eher zufällig anhand von Pegelbeobachtungen nachvollziehen lassen. Für die Verifikation des ersten Betriebsjahres des operationellen Prototyps wurden daher beispielsweise Einsatztagebücher der Feuerwehren/Leitstellen angefordert, um lokal exakte Informationen zur Ereignisausprägung zu erhalten. Dieses Vorgehen ist relativ mühselig, da nicht standardisiert.

Dennoch wäre es von großem fachlichen Wert, solcherlei Informationen fortlaufend und begleitend zum operationellen Betrieb eines Hochwasserfrühwarnsystems zu erheben und zu sammeln. Zum einen könnte das durch eine Standardisierung der einsatzbezogenen Tagebuchführung in den Leitstellen geschehen („Verschlagwortung“). Andererseits könnte beim erfassen kleinräumiger Hochwasserereignisse Crowdsourcing in dem Sinne Potential für Verbesserungen bieten, dass Nutzer beispielsweise via Smartphone-App als sog. „Flood Chaser“ die Magnitude von Ereignissen abschätzen und zumelden.<sup>2</sup>

**Schlussfolgerung 41:** *Crowdsourcing bietet Potential, die Hochwasserfrühwarnung vor allem für unbeepegelte Gebiete weiter zu verbessern. Dazu müssen allerdings eine Reihe von Voraussetzungen erfüllt sein, was aktuell noch nicht gegeben ist.* ❖

## 14.4 Risikokommunikation, Follow-Up der Nutzerbefragung

Risikokommunikation hat zur Aufgabe, das Risikomanagement (siehe Abschnitt 1.2) zu unterstützen und zu verbessern. Es muss klar sein, dass eine effektive Kommunikation von durch Naturgefahren bedingten Risiken nicht alleine durch das Bereitstellen von Informationen (z. B. Warnungen) erreicht werden kann. Vielmehr sind neben der bloßen *Information* auch die *Konsultation* (Beratung) sowie die

<sup>1</sup> Konkret kam ein Fuzzy-Modell zum Einsatz.

<sup>2</sup> Siehe dazu auch: <https://hepex.irstea.fr/crowdsourced-data-for-flood-hydrology-interview-with-flood-chasers-in-france-and-argentina/>; Begriff in Anlehnung an die vor allem im Mittleren Westen der USA aktiven „Storm Chaser“ benutzt.

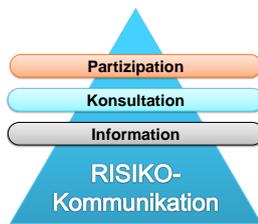


Abbildung 14.4.1: Vorgehensmodell zur Risikokommunikation.

Partizipation (Beteiligung) wichtig (siehe Abb. 14.4.1). Potenziell Betroffene müssen also die Gelegenheit haben, im Zuge der Risikokommunikation mit einbezogen zu werden. Das kann – und sollte – so weit wie im hierin beschriebenen Projekt gehen, sodass die nutzerseitigen Erfordernisse sich bei Konzeption und Auslegung von Kommunikationsprodukten (hier: Frühwarnprodukte) niederschlagen.

Die im Rahmen des Projekts durchgeführte Studie zu Ansprüchen und Erwartungen potentieller Nutzer eines Hochwasserfrühwarnsystems (siehe Kapitel 5) sollte also, da nun ein operationelles Frühwarnprodukt verfügbar ist, nachgeführt werden. Anhand der so zu gewinnenden Befunde kann ermittelt werden, ob die Nutzeranforderungen nunmehr erfüllt sind, oder ob noch Verbesserungsbedarf gesehen wird. Solch ein Follow-Up sollte nach einer geeigneten Karenzzeit von zwei bis drei Jahren erfolgen (also 2019/2020), in der die Nutzer das neue Produkt kennenlernen und in ihr eigenes Risikomanagement mit einfließen lassen können. Mit Blick auf die hierin bereits gewonnenen Erkenntnisse, sollte dabei unbedingt die Bereitschaft und Befähigung der Nutzer von Frühwarnungen, probabilistische Produkte für die Risikobewertung effizient zu nutzen, erhoben werden.

Da die Hochwasserfrühwarnung aktuell über das LHWZ-Webportal veröffentlicht wird, sollte über diesen Kanal prominent zur Rückkoppelung von Fragen/Meinungen/Anregungen an das LHWZ ermuntert werden; aus Kommunikationssicht ist es hier wichtig, keine unnötige Distanz zu den Nutzern (beispielsweise durch überbetont fachliche Ausführungen) zu schaffen und Möglichkeiten zur Interaktion prominent auf der Webseite zur Frühwarnung anzubieten. Zu adressieren wären hier vor allem die Kanäle Telefon und Email. Weiterhin ist zu erwägen – wie beispielsweise in Rheinland-Pfalz praktiziert – die Frühwarnung zukünftig unter einer Kurz-URL (wie beispielsweise [fruehwarnung.sachsen.de](http://fruehwarnung.sachsen.de)) erreichbar zu machen.

Ein drittes Element der Nutzerkommunikation können weiterhin Beiträge für Schulungen, Workshops oder Messen sein. So ist das LHWZ beispielsweise Akteur bei den regelmäßig abgehaltenen Schulungen der sächsischen Wasserwehren, betreute in Vergangenheit eigene Stände auf regionalen Messen (u. a. Baumesse Chemnitz und Baumesse Dresden) oder steht für Veranstaltungen Dritter (wie der Verbraucherzentrale Sachsen oder der Versicherungswirtschaft) zur Verfügung.

**Schlussfolgerung 42:** *Die Interaktion mit den Nutzern von Hochwasserfrühwarnungen ist immanent wichtig, um das zugrunde liegende Warnsystem, Warnprozedere sowie Warnprodukte den Nutzeranforderungen optimal anpassen zu können.* ❖

## 15 Gesamtzusammenfassung

Die Analyse und fachpolitische Bewertung der Hochwasserereignisse der vergangenen Jahre führte – unter anderem – zur Forderung nach einem Hochwasserfrühwarnsystem für kleine, schnell reagierende Einzugsgebiete (vergleiche JESCHKE ET AL., 2010 und KIRCHBACH ET AL., 2013). Obschon mit Blick auf Sachsen eine Reihe von Untersuchungen zu diesem Problemfeld z. B. im Rahmen des RIMAX-Projekts (MERZ ET AL., 2009) erfolgt sind, fehlte bisher eine Studie, welche die Möglichkeiten und Grenzen der Hochwasserfrühwarnung für kleine Einzugsgebiete im Lichte *operationeller* Anforderungen beleuchtete. Diese Studie liegt nun mit dieser Arbeit vor. Darüber hinaus ist es ein weiteres – und in der Außenwahrnehmung sicherlich bedeutungsvolleres – Verdienst des überspannenden Projekts, auf Basis von objektiven, vergleichenden Pilotuntersuchungen ein Hochwasserfrühwarnsystem für Sachsen konzipiert und schließlich in den operationellen Betrieb überführt zu haben. Die angesprochenen Pilotuntersuchungen waren umfassend, sodass neben Aspekten von modellgestützten Vorhersagen als Grundlage von Warnungen ebenso die Qualität meteorologischer Antriebsdaten („Niederschlagsvorhersagen“) sowie die Ansprüche und Erwartungen der Nutzer von Frühwarnprodukten beleuchtet werden konnten.

Die Pilotstudien erstreckten sich dabei über gut drei Jahre (07/2013 bis 11/2016), wobei die LFULG-interne Projektarbeit in der hierin dokumentierten Breite und Tiefe nicht ohne den Beitrag eines Projektreferenten (beschäftigt von 05/2014 bis Ende 2016) hätte geleistet werden können. Durch die fundierten Voruntersuchungen, bis hin zur fachlichen Feinkonzeption, konnte die IT-technische Implementierung sowie Operationalisierung des eigentlichen Hochwasserfrühwarnsystems sehr zügig im Zeitraum 06/2016 bis 11/2016 realisiert werden. Im ersten Halbjahr 2017 erfolgte dann die Konzeption und Umsetzung zur Erstellung und Veröffentlichung von Produkten zur Hochwasserfrühwarnung in Form von via LHWZ-Webportal bereitgestellten Warnkarten („Ampelkarten“).

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit gewonnenen Hauptbefunde sind, dass generell eine Hochwasserfrühwarnung, welche das Gros der Nutzeranforderung befrie-

digt, mit einem signifikanten prädiktiven Nutzen möglich ist. Andererseits kann insbesondere bei Extremereignissen nicht jederzeit eine hinreichend gute Vorhersage/Prognose erzielt werden. Die Hauptursache hierfür ist die unzureichende Vorhersagbarkeit kleinräumiger, konvektiver Niederschlagsereignisse. Diese Unsicherheiten sollten entsprechend kommuniziert werden. Die vorliegende Studie hat weiterhin den Mehrwert einer probabilistischen gegenüber einer deterministischen Vorhersagephilosophie herausgestellt. Allerdings müssen die Nutzer von Frühwarnprodukten erst noch in die Lage versetzt werden, probabilistische Vorhersage-/Warnprodukte entsprechend in ihre Entscheidungen mit einzubeziehen. Zukünftige Entwicklungen sollten daher die folgenden Bereiche umfassen: (a) Verbesserung der quantitativen Niederschlagsvorhersage im Kurzzeit- und Kurzfristbereich, (b) Stärkung der Befähigung zur korrekten Interpretation und Nutzung von probabilistischen Warnprodukten auf Nutzerseite sowie (c) Produktion probabilistischer Warnungen konform zum aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik.

Mit Blick auf die hydrologische Modellierung zur Ableitung von Hochwasserfrühwarnungen hat sich gezeigt, dass für diesen Anwendungsfall in der Zusammenschau aller Vor- und Nachteile, vergleichsweise einfache und robust zu regionalisierende Verfahren weitaus aufwändigeren Verfahren durchaus ebenbürtig sind. Es wurde nachgewiesen, dass Scoring-Methoden für Vorhersageweiten von 12 h und mehr im avisierten Raumskalenbereich bis 200 km<sup>2</sup> gute Ergebnisse liefern können. Gleichsam muss – mit Blick auf das bezüglich der Qualität quantitativer Niederschlagsprodukte Gesagte – die Gültigkeit von Frühwarnungen auf eine bestimmte Gebietsgröße „nach unten hin“ limitiert werden, die im Skalenbereich typischer konvektiver Zellen liegen sollte (bis einige zehn Quadratkilometer). Am Punkt können daher keine im Sinne der zu erwartenden Vorhersagegüte belastbaren Hochwasserfrühwarnungen erstellt werden!

Es wurde weiterhin herausgearbeitet, dass es Potential für zukünftige Verbesserungen am neuen sächsischen Hochwasserfrühwarnsystem gibt. Das betrifft (a) die Berücksichtigung von Hochwasserfrühwarnungen im Sinne

des amtlichen Hochwassernachrichten- und Alarmdienstes, (b) die Verarbeitung von Unsicherheiten, (c) die Einbeziehung von Crowdsourcing-Informationen zur echtzeitnahen Verbesserung der Vorhersagegüte sowie (d) ein kontinuierliches Ansprechen und Einbinden der Nutzer von Frühwarnprodukten im Zuge weiterer Änderungen/Ergänzungen des Hochwasserfrühwarnsystems.

Abschließend soll an dieser Stelle noch einmal deutlich herausgestellt werden, dass für extrem seltene und extrem kleinräumige Ereignisse die Güte quantitativer Niederschlagsvorhersagen gering sein wird (vergleiche Kapitel 6 und 7) und dass damit die zur Verfügung stehende Zeit, um Maßnahmen zu ergreifen sich der hydrologischen Reaktionszeit angleicht; im Extremfall kann diese in der Größenordnung von lediglich einer Viertelstunde oder weniger liegen! Im Sinne einer ereignisbezogenen Warnung sind hier – wenn überhaupt – nur noch rein QPE-basierte Warnprodukte effektiv (vergleiche beispielsweise Produkte unter 1.6.6 und 1.6.7). Damit ist auch klar, dass für solcherlei Fälle der Schutz von Leib und Leben im Vordergrund stehen muss. In dieser Hinsicht muss vor allem die Verhaltensvorsorge potentiell Betroffener gestärkt werden; diese muss allerdings *im Vorfeld* von Ereignissen erfolgen, da im Ereignisfall aufgrund der hohen Prozessdynamik keine effiziente Kommunikation mehr möglich ist. Kernbotschaften wie „Nicht durch fließendes Wasser laufen/fahren!“, „Keine Unterführungen betreten/durchfahren!“ oder „Keine tiefer gelegene Räume betreten!“ müssen im Ereignisfall den Betroffenen gewahr sein, was nur über eine kontinuierliche Bewusstseinsbildung erreicht werden kann. Nichtsdestoweniger sollten in diesem Sinne konkrete Verhaltensempfehlungen den Warnungen beigegeben werden.

**Teil V**

**Anhänge**

# Liste der projektbezogenen Veröffentlichungen und Vorträge

## Veröffentlichungen in Zeitschriften und Tagungsbänden<sup>1</sup>

PHILIPP, A., KERL, F., METZKES, C., SINGER, T., WAGNER, M., SCHÜTZE, N. UND MÜLLER, U. (2016): *Small-scale (flash) flood early warning in the light of operational requirements: Opportunities and limits with regard to user demands, driving data, and hydrologic modeling techniques*. Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences, **373**: 201–208.

KERL, F., PHILIPP, A., METZKES, C., SINGER, T., WAGNER, M., SCHÜTZE, N. UND MÜLLER, U. (2016): *Kleinräumige Hochwasserfrühwarnung im Lichte operativer Anforderungen: Chancen und Grenzen bezüglich Nutzeransprüchen, Antriebsdaten sowie hydrologischer Modellansätze*. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, **37**: 1–14.

PHILIPP, A., KERL, F. UND MÜLLER, U. (2015): *Ansprüche potentieller Nutzer an ein Hochwasserfrühwarnsystem für Sachsen*. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, **59**, 1: 4–22.

## Technische Berichte<sup>2</sup>

SCHÜTZE, N., METZKES, C. UND WAGNER, M. (2017): *Endbericht Hochwasservorhersage zur kleinräumigen Frühwarnung in Sachsen – Flächendeckende Anwendung, Vergleich von zu erwartenden Vorhersage-Gütern sowie Bewertung der räumlichen Übertragbarkeit von deterministischen, datengetriebenen sowie Scoring-Modellen für den Anwendungsfall der HW-Frühwarnung für kleine Einzugsgebiete in Sachsen*. Technische Universität Dresden.

BCE (2016): *Softwarespezifikation IT-Vorhaben: Konzeption, Implementierung und Operationalisierung einer Perspektive zur Hochwasserfrühwarnung in KALYPSO*. Björnson Beratende Ingenieure GmbH, Koblenz.

SCHÜTZE, N., SINGER, T. UND WAGNER, M. (2016): *Endbericht Niederschlagsverifikation – Verifikation probabilistischer quantitativer Niederschlagsvorhersageprodukte (QPF) im Hinblick auf deren Eignung als Antrieb für ein Hochwasserfrühwarnsystem für kleine Einzugsgebiete in Sachsen*. Technische Universität Dresden.

SCHWARZE, R., SINGER, T., STANGE, P., WAGNER, M. UND SCHÜTZE, N. (2015): *Entwicklung und beispielhafte Implementierung von deterministischen sowie datengetriebenen Methoden zur hydrologischen Vorhersage und Prognose in kleinen, teilweise unbeobachteten Einzugsgebieten für die Ableitung von Hochwasserfrühwarnungen*. Technische Universität Dresden.

<sup>1</sup> mit Peer-Review

<sup>2</sup> im Auftrag des LfULG

KERL, F. UND PHILIPP, A. (2015): *Verifikation von durch das Landeshochwasserzentrum Sachsen genutzten quantitativen DWD-Niederschlagsvorhersageprodukten für den Zeitraum 04/2011 bis einschließlich 06/2014*. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.

## Abschlussarbeiten<sup>1</sup>

SAUER, C. (2017): *Konzeption sowie prototypische Implementierung und Anwendung eines mittels Crowdsourcing-Informationen konditionierbaren Soft-Computing basierten Hochwasserfrühwarnsystems für kleine, schnell reagierende Einzugsgebiete Sachsens*. Masterarbeit, Technische Universität Dresden.

METZKES, C. (2016): *Entwicklung und Anwendung von robusten Bewertungsansätzen für die frühzeitige Abschätzung der Hochwasserneigung in kleinen (sub-mesoskaligen) Einzugsgebieten in Sachsen*. Masterarbeit, Technische Universität Dresden.

SINGER, T. (2015): *Konzeption, Implementierung und vergleichende Anwendung von Soft-Computing-Ansätzen für die Hochwasserfrühwarnung in sub-mesoskaligen Einzugsgebieten*. Masterarbeit, Technische Universität Dresden.

## Konferenzbeiträge

MÜLLER, U. UND PHILIPP, A. (2017): *Erste Erfahrungen mit dem Hochwasserfrühwarnsystem in Sachsen*. 30. DWA-Hochwassertag, Kassel, 30.11.2017.

HÄNSEL, K. UND PHILIPP, A. (2017): *Starkregen – eine Herausforderung für Sachsen*. Florian – Fachmesse für Feuerwehr, Zivil- und Katastrophenschutz, Dresden, 06.10.2017.

PHILIPP, A., KERL, F., METZKES, C., WAGNER, M. UND SCHÜTZE, N. (2017): *Vergleichende Bewertung unterschiedlicher Modellansätze mit Blick auf die Ableitung von Hochwasserfrühwarnungen*. BfG-Kolloquium Statistische Methoden in der hydrologischen Vorhersagepraxis und deren Nutzen, Koblenz, 13. bis 14.09.2017.

METZKES, C., SINGER, T., WAGNER, M., SCHÜTZE, N., KERL, F. UND PHILIPP, A. (2017): *A comparative study of data-driven approaches for flood early warning in small catchments*. EGU General Assembly, Wien, 23. bis 28.04.2017.

PHILIPP, A., KERL, F., METZKES, C., SINGER, T., WAGNER, M., SCHÜTZE, N. UND MÜLLER, U. (2016): *Small-scale (flash) flood early warning in the light of operational requirements: Opportunities and limits with regard to user demands, driving data, and hydrologic modeling techniques*. 7th International Water Resources Management Conference of ICWRS/IAHS, Bochum, 18.05.2016.

KERL, F., PHILIPP, A., METZKES, C., SINGER, T., WAGNER, M., SCHÜTZE, N. UND MÜLLER, U. (2016): *Kleinräumige Hochwasserfrühwarnung im Lichte operativer Anforderungen: Chancen und Grenzen bezüglich Nutzeransprüchen, Antriebsdaten sowie hydrologischer Modellansätze*. Tag der Hydrologie, Koblenz, 17.03.2016.

KERL, F. UND PHILIPP, A. (2015): *Hochwasserfrühwarnung für kleine Einzugsgebiete in Sachsen: Aktueller Stand und Perspektiven*. DWD Kundenforum Wasserwirtschaft, Offenbach, 03.11.2015.

<sup>1</sup>co-betreut durch das LHWZ

# Liste der Schlussfolgerungen

## I Grundlagen: Herausforderungen bei der Hochwasserfrühwarnung

**Schlussfolgerung 1:** Für Sachsen gilt, dass extreme Hochwasserereignisse sowohl im Winter/Frühjahr als auch im Sommerhalbjahr auftreten können. Im Sommerhalbjahr sind neben den durch großräumigen, skaligen Niederschlag verursachten Ereignissen, auch durch konvektiven Starkregen hervorgerufene Sturzfluten relevant.

**Schlussfolgerung 2:** Niederschlagsgetriebene Sturzfluten sind Ereignisse, welche durch eine sehr kurze Zeitdifferenz zwischen Niederschlagsbeginn und beginnendem Abflussanstieg sowie Scheitelanstiegszeiten von weniger als sechs Stunden charakterisiert sind. Sie betreffen vor allem kleine Einzugsgebiete. Ihre Hauptursache ist das lokale Auftreten großer Niederschlagsmengen in kurzer Zeit.

**Schlussfolgerung 3:** Innerhalb eines prototypischen Hochwasserrisikomanagementkonzepts kommt einer Hochwasserfrühwarnung durch die Möglichkeit der Verringerung der Vulnerabilität eine potentiell risikomindernde Rolle zu.

**Schlussfolgerung 4:** Eine Hochwasserwarnung muss nicht ausschließlich auf der Basis von Messwerten/Beobachtungen abgeleitet werden, sondern kann (und sollte) eine meteorologische bzw. hydrologische Vorhersage zur Grundlage haben.

**Schlussfolgerung 5:** Insofern eine gewisse Vorwarnzeit beabsichtigt ist und/oder eine Warnung für kleine Einzugsgebiete erstellt werden soll, muss eine Vorhersage von Wasserstand und Abfluss verfügbar sein. Mit zunehmender Vorhersageweite sowie abnehmender Größe des betrachteten Gebietes steigt die Unsicherheit der Vorhersage und sinkt ihre Güte.

**Schlussfolgerung 6:** Den Fest- und Lockergesteinsbereich Sachsens dominieren Gebiete, welche potentiell die Genese von Sturzfluten begünstigen. Das betrifft sowohl die meteorologischen Bedingungen (Begünstigung und Verstärkung von atmosphärischer Konvektion), als auch morphologisch-topologisch-hydrologische Aspekte, wie Hangneigung, Exposition, Gewässernetz sowie die Neigung zur Bildung schneller Abflusskomponenten.

**Schlussfolgerung 7:** Es gibt kein standardisiertes Hochwasserfrühwarnsystem; jedes Frühwarnsystem sollte einen starken regionalen Bezug bei Konzeption und Betrieb haben. Bemerkenswert ist die zunehmende Verarbeitung probabilistischer Antriebe, insbesondere bei der Ganglinienvorhersage. Probabilistische Vorhersageprodukte hingegen werden derzeit noch eher Fachnutzern vorbehalten.

**Schlussfolgerung 8:** Ein Frühwarnsystem muss effektiv, verlässlich und adressatengerecht sein. Ein umfassendes Frühwarnsystem kann nicht nur Module zur Erstellung der eigentlichen Warnprodukte enthalten; vielmehr sollten Aspekte wie Verteilung von Warnungen, Risikokommunikation, Informations- und Verhaltensvorsorge sowie Grundlagenerhebungen (z. B. Ereignisanalysen) in einem ganzheitlichen Frühwarnkonzept Niederschlag finden.

**Schlussfolgerung 9:** Für eine Frühwarnung für kleine, schnell reagierende Einzugsgebiete ist die Einbeziehung von quantitativen Niederschlagsvorhersagen unumgänglich, um den Vorhersagezeitraum zu erweitern und somit überhaupt erst praktikable Vorwarnzeiten zu realisieren. Gleichsam ist die Vorhersage der raum-zeitlichen Niederschlagsverteilung mit sehr großen Unsicherheiten behaftet und wird es auch auf absehbare Zeit bleiben. Eine verlässliche, hydro-meteorologisch basierte Hochwasserfrühwarnung ist nur für einen Vorhersagezeitraum von wenigen Stunden möglich. Für größere Vorhersageweiten kann die Einbeziehung von Ensembles eine Möglichkeit

sein, die Vorhersageunsicherheiten zumindest zu quantifizieren.

**Schlussfolgerung 10:** Zur Hochwasserfrühwarnung können alle verfügbaren hydrologischen Modellansätze/-philosophien – von aufwändiger, flächendifferenzierter Prozessmodellierung bis hin zu einfachen Bewertungsverfahren – zum Einsatz kommen. Dabei gebietet das Prinzip der Parsimonie die Wahl desjenigen Modellansatzes, welcher so einfach wie möglich und so komplex wie nötig ist. Diese Wahl kann a priori nicht getroffen werden, was die vergleichende Untersuchung verschiedener Ansätze motiviert. Das Gesagte trifft gleichsam für die meteorologischen Antriebsdaten zu.

**Schlussfolgerung 11:** Die hydrologische Vorhersage ist ein Anfangs-Randwertproblem. Anfangswerte (Zustände zu Beginn des Vorhersagezeitraums) sowie Randwerte (z. B. Niederschlagsvorhersagen) sind mit Fehlern behaftet. Mit diesen Fehlern sollte mittels Verfahren der Datenassimilation, Fehlerkorrektur und Nachführung umgegangen werden, um die Vorhersagegüte zu verbessern.

**Schlussfolgerung 12:** Probabilistische Vorhersagen müssen hinsichtlich ihrer Güte mit anderen Methoden und Werkzeugen bewertet werden, als deterministische Vorhersagen. Verschiedene, für eine integrative, gesamtzeitliche Gütebewertung wichtige Eigenschaften einer probabilistischen Vorhersage, lassen sich nur teilweise gleichzeitig betrachten.

**Schlussfolgerung 13:** Trotz der Methoden zur Fehlerreduktion (wie Datenassimilation, Zustandsnachführung und Fehlerkorrektur) verbleibt bei der hydrologischen Simulation und Vorhersage eine Restunsicherheit in Form der prädiktiven Unsicherheit. Die Quantifizierung der prädiktiven Unsicherheit liefert eine Wahrscheinlichkeitsaussage für vorhergesagte Werte und ist per se methodisch und rechentechnisch eher aufwändig. Meist basiert sie auf Ensemble-Techniken. Ganz grundsätzlich und vorab einer operationellen Bestimmung der prädiktiven Unsicherheit, muss die Frage geklärt werden, wie und mit welchen Konsequenzen für das Risikomanagement solche Wahrscheinlichkeitsaussagen kommuniziert werden.

**Schlussfolgerung 14:** Die Vorhersage bzw. Prognose für unbeobachtete Gebiete (also den Großteil kleiner Einzugsgebiete) stellt größte Herausforderungen an die hydrologischen Wissenschaften. Das Fehlen von Abflussbeobachtungen führt stets zu Einschränkungen des prädiktiven Nutzens von Modellergebnissen. Gleichsam muss für die Vorhersage und Prognose für unbeobachtete Gebiete erhöhter Aufwand hinsichtlich Daten und Methoden getrieben werden. Aufwand und Nutzen eines avisierten Verfahrens sind daher sehr sorgfältig abzuwägen, insbesondere mit Blick auf operationelle Anforderungen.

**Schlussfolgerung 15:** Einem Produkt zur Hochwasserfrühwarnung zugrunde liegende Bewertungen (auf Basis von Beobachtungen/Vorhersagen von Niederschlag/Abfluss) haben meist punktuellen oder lokalen Bezug. Für das Hochwasserrisikomanagement sind aber generellere Warntausagen mit flächigem, regionalen Bezug wichtig. Für diese räumliche Aggregation muss ein geeignetes Verfahren konzipiert und operationell betrieben werden.

**Schlussfolgerung 16:** Rezente Veränderungen im Häufigkeitsregime kleinräumiger Starkregenereignisse mit Andauern kleiner 24 Stunden sind derzeit nicht sicher nachweisbar. Bemerkenswert ist das gehäufte Auftreten solcher Ereignisse in Sachsen von Ende Juni bis Mitte August.

**Schlussfolgerung 17:** Trotz erheblicher methodischer und technischer Anstrengungen und des wissenschaftlichen Fortschritts wird sich die operationelle Vorhersagbarkeit extremer, kleinräumiger Hochwasserereignisse als Folge konvektiver Starkregen in den kommenden Jahren nicht grundlegend verbessern. Gleichsam sollte der Mehrwert probabilistischer Methoden genutzt werden; dazu ist die Schaffung und Wahrung der Bereitschaft zum Empfang und zur Interpretation probabilistischer Vorhersage-/Warnprodukte bei potentiellen Nutzern notwendig.

**Schlussfolgerung 18:** Dem notwendigen synergetischen Vorgehensmodell entsprechend ist es zweckmäßig, die Aspekte (a) Ansprüche und Erwartungen der Nutzer von Frühwarnprodukten, (b) Qualität der meteorologischen Antriebsdaten sowie (c) Modellvorhersagen als Grundlage von Warnungen zu untersuchen und zu bewerten.

**Schlussfolgerung 19:** *Fachleute sind sich generell einig, dass eine Hochwasserfrühwarnung für kleine, schnell reagierende Einzugsgebiete mit prädiktivem Nutzen möglich ist (gegenüber dem Szenario „keine Vorhersage“ oder „würfeln“). Der prädiktive Nutzen („Vorhersagbarkeit“) ist allerdings gemeinhin schmal. Erschwerend kommt hinzu, dass die schadensträchtigen Ereignisse naturgemäß selten sind und bei diesen Ereignissen die Vorhersagbarkeit am geringsten ist.*

## II Pilotstudien: Möglichkeiten und Grenzen bei der Hochwasserfrühwarnung

**Schlussfolgerung 20:** *Eine Befragung ist ein geeignetes Instrument, um Ansprüche und Erwartungen von Nutzern von Frühwarnprodukten zu erheben. Nach Einführung neuer Produkte bzw. Anpassungen sollte ein Follow-Up der Erhebung durchgeführt werden. Eine Information der Nutzer über Entwicklungs-/Verbesserungsprozesse eines Frühwarnsystems begleitend zu einer Befragung ist ein Element einer partizipativen Verhaltensvorsorge.*

**Schlussfolgerung 21:** *Die befragten Nutzergruppen unterscheiden sich nicht wesentlich mit Blick auf ihr Antwortverhalten. Bemerkenswert ist die große Streuung hinsichtlich der gemachten Angaben bezüglich benötigter Vorhersagezeiträume/Vorwarnzeiten. Die Arbeit und Produkte des Landeshochwasserzentrums Sachsens wurden mehrheitlich positiv bewertet. Damit wird das Landeshochwasserzentrum – zumindest bei den offiziellen Teilnehmern des Hochwassernachrichten- und Alarmdienstes – seinem Anspruch als Meinungsführer gerecht.*

**Schlussfolgerung 22:** *Die potentiellen Nutzer eines Hochwasserfrühwarnsystems für Sachsen geben an, Vorhersagezeiträume von 12 oder 24 Stunden zu benötigen, um geeignete Hochwasserabwehrmaßnahmen zu ergreifen. Die Information über den zu erwartenden Maximalwasserstand wird als wichtigster Inhalt der Warnung erachtet.*

**Schlussfolgerung 23:** *Es existiert eine deutliche Diskrepanz zwischen den von den Nutzern als notwendig erachteten Vorwarnzeiten und dem mittels hydro-*

*meteorologischen Prozeduren verlässlich abdeckbaren Vorhersagezeitraum. Vorwarnungen für Zeiträume von drei und mehr Stunden sollten möglichst mit begleitenden Unsicherheitsangaben kommuniziert werden, was wiederum die Verwendung probabilistischer Antriebe erfordert. Dazu müssten die Nutzer in der Lage sein, diese Unsicherheitsinformationen zu bewerten und in konkrete Handlungen zu übersetzen. Damit einher geht, dass dann die Risikobewertung bei jedem einzelnen Nutzer erfolgen muss.*

**Schlussfolgerung 24:** *Quantitative Niederschlagsvorhersagen bringen die maßgeblichen Unsicherheiten in kleinräumige hydrologische Vorhersagen ein. Die Kenntnis ihrer Güte ist daher wichtig mit Blick auf die potentiell zu erzielende Güte hydrologischer Vorhersagen.*

**Schlussfolgerung 25:** *Die Güte quantitativer Niederschlagsvorhersagen ist unter anderem abhängig von Größe und Schärfe des zugrunde gelegten Bilanzgebietes. Während aus meteorologischer Sicht möglicherweise die ungefähre regionale Lage eines Niederschlagsgebietes ausreichend sein mag, so spielt für hydrologische Vorhersagen – gerade mit Blick auf kleine Einzugsgebiete – die räumlich (und zeitlich) exakte Verortung vorhergesagter, kleinräumiger Niederschläge die entscheidende Rolle.*

**Schlussfolgerung 26:** *Die Güte und Eignung von QPFs zur Vorhersage von Gebietsniederschlägen ist eine Funktion der Magnitude/Schwellenwerte der untersuchten Ereignisse, der Vorhersageweite bzw. des Vorhersagezeitraums sowie der Größe der betrachteten Bilanzgebiete. Aus hydrologischer Sicht interessante Ereignisse größerer Jährlichkeiten sind aufgrund ihrer Seltenheit nicht oder nur schwer zu verifizieren.*

**Schlussfolgerung 27:** *Auf Basis von Verifikationsergebnissen ist es schwer, ein bestimmtes Produkt zu bevorzugen oder auszuschließen. Bei der Wahl einer geeigneten QPF für hydrologische Anwendungen müssen daher noch weitere Aspekte berücksichtigt werden (z. B. Verfügbarkeit des Produkts, Verarbeitbarkeit etc.). Ideal wäre im operationellen Kontext das Einbeziehen mehrerer QPFs, wobei die Wahl der „richtigen“ dann wiederum einem Vorhersagemeteorologen/-hydrologen obliegen sollte.*

**Schlussfolgerung 28:** Generell zeigt sich ein Mehrwert probabilistischer Vorhersagen gegenüber deterministischen QPFs. Allerdings verblasst der prädiktive Nutzen von NWP-Produkten mit größeren (hochwasserrelevanten) Niederschlagsintensitäten. Für extreme und gleichzeitig kleinräumige Ereignisse (mehr als 50 Millimeter in 6 Stunden) ist kein deutlicher Nutzen durch NWP zu erwarten!

**Schlussfolgerung 29:** Für vergleichbare Modellsetups (z.B. COSMO-DE und -EPS) verifiziert das probabilistische Produkt besser, hat also gegenüber einer deterministischen Niederschlagsvorhersage einen größeren prädiktiven Nutzen. Dieser Mehrwert ist allerdings nur dann gegeben, wenn das probabilistische Produkt auch mit den entsprechenden Techniken verarbeitet wird. Größere Genauigkeit im deterministischen Sinne und eine probabilistische Betrachtung der Vorhersagen gehen also Hand in Hand!

**Schlussfolgerung 30:** Für die Ganglinienvorhersage sind Bewertungsansätze der Hochwasserneigung (Scoring-Verfahren) ungeeignet; für den Anwendungsfall Hochwasserfrühwarnung sind sie jedoch für mittlere Vorhersageweiten (ab 12 Stunden) datengetriebenen und deterministischen Verfahren annähernd ebenbürtig.

**Schlussfolgerung 31:** Für den Anwendungsfall Hochwasserfrühwarnung bietet ein simples Scoring-Verfahren einen hohen prädiktiven Nutzen bei gleichzeitig guter räumlicher Übertragbarkeit bzw. Generalisierbarkeit und ist in dieser Hinsicht datengetriebenen und deterministischen Verfahren überlegen.

### III Umsetzung: Ein operationelles Hochwasserfrühwarnsystem für Sachsen

**Schlussfolgerung 32:** Pilotuntersuchungen sind essentiell wichtig, um die Aspekte Nutzeransprüche, Eignung meteorologischer Antriebsdaten sowie Eignung hydrologischer Modellansätze im Kontext der Hochwasserfrühwarnung fachlich zu beleuchten. Somit kann eine belastbare Basis für die fachliche und technische Spezifikation eines operationellen Hochwasserfrühwarnsystems gelegt werden.

**Schlussfolgerung 33:** Die Konzeption eines IT-Systems zur Hochwasserfrühwarnung ist anspruchsvoll; zum einen muss ein fachlich einheitlicher Workflow gewährleistet werden, zum anderen soll das System robust für einen teilautomatisierten, operationellen Betrieb sein.

**Schlussfolgerung 34:** Weitere wichtige Anforderungen an ein IT-System zur Hochwasserfrühwarnung sind das Ansprechen verschiedener Publikationsschnittstellen sowie die Möglichkeit manueller Eingriffe.

**Schlussfolgerung 35:** Die am LHWZ bestehende IT-Infrastruktur mit den Systemen HWIMS sowie KALYPSO bietet ein sehr günstiges Umfeld für eine zeit- und kosteneffiziente Erfüllung der an das Frühwarnsystem gestellten Anforderungen. Das betrifft Konzeption, Implementierung als auch den operationellen Betrieb sowie die Wartung und Pflege des IT-Systems KALYPSO-Frühwarnung.

**Schlussfolgerung 36:** Das konzeptionelle und technische Einpassen des Frühwarnsystems in den Systemkontext des LHWZ bietet die Voraussetzung für ein umfassendes und flexibles Management von Frühwarninformationen, inklusive ihrer Veröffentlichung.

**Schlussfolgerung 37:** Die Verifikation des operationellen Prototyps für das erste Betriebsjahr bestätigt das bereits im Rahmen der Vorstudien gewonnene Bild, dass einfache, klassifizierende Bewertungsverfahren zur Abschätzung der Hochwasserneigung für die Hochwasserfrühwarnung gut geeignet sind.

**Schlussfolgerung 38:** *Eine konzeptionell untersetzte Öffentlichkeitsarbeit hat im Sinne der Informationsvorsorge eine große Bedeutung; nur so kann der breiten Öffentlichkeit die Verfügbarkeit, Erreichbarkeit und Bedeutung von Hochwasserfrühwarnprodukten vermittelt werden.*

## **IV Ausblick und Gesamtzusammenfassung**

**Schlussfolgerung 39:** *Die umgesetzte IT-Lösung für das Frühwarnsystem erlaubt prinzipiell eine Verteilung von Produkten zur Hochwasserfrühwarnung aktiv an Informationsempfänger im Sinne von HWNAVO/HWMO. Es sollte fachpolitisch geklärt und festgelegt werden, ob das beabsichtigt ist, oder nicht.*

**Schlussfolgerung 40:** *Die Einbeziehung von Unsicherheiten bei der Hochwasserfrühwarnung ist grundsätzlich möglich und würde theoretisch auch einen prädiktiven Mehrwert bedeuten. Allerdings stellt sich hier die Frage nach Bereitschaft und Befähigung der Nutzer von Frühwarnungen, probabilistische Produkte für die Risikobewertung effizient zu nutzen. Nutzerseitig besteht ein Bedarf nach Schulung und Training im Umgang mit Unsicherheiten, sollen probabilistische Vorhersageprodukte ihren Mehrwert voll entfalten.*

**Schlussfolgerung 41:** *Crowdsourcing bietet Potential, die Hochwasserfrühwarnung vor allem für unbepegelte Gebiete weiter zu verbessern. Dazu müssen allerdings eine Reihe von Voraussetzungen erfüllt sein, was aktuell noch nicht gegeben ist.*

**Schlussfolgerung 42:** *Die Interaktion mit den Nutzern von Hochwasserfrühwarnungen ist immanent wichtig, um das zugrunde liegende Warnsystem, Warnprocedere sowie Warnprodukte den Nutzeranforderungen optimal anpassen zu können.*

## Literaturverzeichnis

- ADAMS, T. & PAGANO, T. [Hrsg.] (2016): *Flood Forecasting – A Global Perspective*. Academic Press.
- AJAMI, N. K., DUAN, Q. Y. & SOROOSHIAN, S. (2007): *An integrated hydrologic Bayesian multimodel combination framework: confronting input, parameter, and model structural uncertainty in hydrologic prediction*. In: *Water Resources Research*, **43**, 1: 1–19.
- ALT, E. & FICKERT, R. (1936): *Die Hochwasserkatastrophe am 8. Juli 1927 im östlichen Erzgebirge*. In: *Wissenschaftliche Abhandlungen des Reichsamtes für Wetterdienst*, **2**, 4.
- ANDERSON, M. G. & BURT, T. P. [Hrsg.] (1985): *Hydrological Forecasting*. Wiley.
- ARMSTRONG, J. S. & OVERTON, S. (1977): *Estimating non-response bias in mail surveys*. In: *Journal of Marketing Research*, **14**, 3: 396–402.
- AVEN, T. & RENN, O. (2010): *Risk Management and Governance – Concepts, Guidelines and Applications*, Bd. 16. Springer Berlin Heidelberg.
- BACKHAUS, K., ERICHSON, B., PLINKE, W. & WEIBER, R. (2008): *Multivariate Analysemethoden: Eine anwendungsorientierte Einführung*. 12. Aufl. Springer Berlin Heidelberg.
- BALDAUF, M., FÖRSTNER, J., KLINK, S., REINHARDT, T., SCHRAFF, C., SEIFERT, A. & STEPHAN, K. (2009): *Kurze Beschreibung des Lokal-Modells Kurzzeit COSMO-DE (LMK) und seiner Datenbanken auf dem Datenserver des DWD*. Techn. Ber., Deutscher Wetterdienst.
- BARTELS, H., DIETZER, B., MALITZ, G., ALBRECHT, F. M. & GUTTENBERGER, J. (2005): *KOSTRA-DWD-2000 – Starkniederschlagshöhen für Deutschland (1951 bis 2000) – Fortschreibungsbericht*. Techn. Ber., Deutscher Wetterdienst, Hydrometeorologie.
- BARTELS, J., BLIEFERNICHT, J. & SEIDEL, J. (2016): *Evaluation ensemble-basierter Abflussvorhersagen für ausgewählte Pegel in Rheinland-Pfalz*. Techn. Ber., Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung, Lehrstuhl Hydrologie und Geohydrologie, Universität Stuttgart.
- BAUER, P., THORPE, A. & BRUNET, G. (2015): *The quiet revolution of numerical weather prediction*. In: *Nature*, **525**: 47–55.
- BCE (2015): *Technische Dokumentation KALYPSO (Installation Landeshochwasserzentrum Sachsen)*. Techn. Ber., BjörnSEN Beratende Ingenieure GmbH, Koblenz.
- BCE (2016a): *Datenverarbeitungskonzept IT-Vorhaben: Konzeption, Implementierung und Operationalisierung einer Perspektive zur Hochwasserfrühwarnung in KALYPSO*. Techn. Ber., BjörnSEN Beratende Ingenieure GmbH, Koblenz.
- BCE (2016b): *Softwarespezifikation IT-Vorhaben: Konzeption, Implementierung und Operationalisierung einer Perspektive zur Hochwasserfrühwarnung in KALYPSO*. Techn. Ber., BjörnSEN Beratende Ingenieure GmbH, Koblenz.
- BCE & TUHH (2015): *Anwenderhandbuch KALYPSO*. Techn. Ber., BjörnSEN Beratende Ingenieure GmbH, Koblenz und Institut für Wasserbau der TU Hamburg-Harburg.
- BECKER, A. (1992): *Regionalisierung in der Hydrologie*, Kap. Methodische Aspekte der Regionalisierung, 16–32. 1. Aufl. DFG.
- BECKER, P., BECKER, A., DALELANE, C., DEUTSCHLÄNDER, T., JUNGHÄNEL, T. & WALTER, A. (2016): *Die Entwicklung von Starkniederschlägen in Deutschland – Plädoyer für eine differenzierte Betrachtung*. Techn. Ber., Deutscher Wetterdienst, Geschäftsbereich Klima und Umwelt.
- BERG, P., MOSELEY, C. & HAERTER, J. O. (2013): *Strong increase in convective precipitation in response to higher temperatures*. In: *Nature Geoscience*, **6**: 181–195.
- BERNHOFER, C., GOLDBERG, V., BERGER, F., N., J., PE-TERENZ, N. & SCHULZ, M. (2009): *Projekt EXTRA –*

- Abschlussbericht*. Techn. Ber., TU Dresden, Institut für Hydrologie und Meteorologie; Deutscher Wetterdienst, Meteorologisches Observatorium Lindenberg.
- BEVEN, K. J. (2004): *Robert E. Horton's perceptual model of infiltration processes*. In: *Hydrological Processes*, **18**, 17: 3447–3460.
- BEVEN, K. J. (2012): *Rainfall-Runoff Modelling: The Primer*. 2. Aufl. John Wiley and Sons Chichester.
- BEVEN, K. J. & BINLEY, A. (1992): *The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction*. In: *Hydrological Processes*, **6**, 3: 279–298.
- BIRKMANN, J., VOLLMER, M., WOLFERTZ, J. & WELLE, T. (2011): *Indikatoren zur Abschätzung von Vulnerabilität und Bewältigungspotenzialen, Forschung im Bevölkerungsschutz*, Bd. 13, Kap. Verwundbarkeit der Bevölkerung gegenüber Hochwasserereignissen, 95–193. 1. Aufl. Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe Bonn.
- BLIEFERNICHT, J. (2010): *Probability forecasts of daily areal precipitation for small river basins*. Dissertation, Universität Stuttgart, Institut für Wasserbau.
- BLÖSCHL, G., NESTER, T., PARAJKA, J. & KOMMA, J. (2014): *Flood forecasting on the Austrian Danube and data assimilation (in German)*. In: *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, **58**, 2: 64–72.
- BOGNER, K., LIECHTI, K. & ZAPPA, M. (2017): *Technical note: Combining quantile forecasts and predictive distributions of streamflow*. In: *Hydrology and Earth System Sciences*, **21**: 5493–5502.
- BOHLE, H. G. & GLADE, T. (2007): *Naturrisiken und Sozialkatastrophen*, Kap. Vulnerabilitätskonzepte in Sozial- und Naturwissenschaften, 99–119. 1. Aufl. Elsevier/Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- BREMICKER, M. & VARGA, D. (2014): *Kommunikation der Verlässlichkeit von Hochwasserfrühwarnung und Hochwasservorhersage in Baden-Württemberg*. In: *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, **58**, 2: 76–83.
- BRILLY, M. & POLIC, M. (2005): *Public perception of flood risks, flood forecasting and mitigation*. In: *Hydrology and Earth System Sciences*, **5**: 345–355.
- BROWN, B., ATGER, F., BROOKS, H., CASATI, B., DAMRATH, U., EBERT, B., GHELLI, A., NURMI, P., STEPHENSON, D., WILSON, C. & L., W. (2004): *Recommendations for the verification and intercomparison of QPFs from operational NWP models*. Techn. Ber., WWRP/WGNE Joint Working Group on Verification.
- BÜTTNER, U., FÜGNER, D. & WINKLER, U. (2001): *Das Hochwasser am 5./6. Juli 1999 im Raum Marienberg im Erzgebirge*. In: *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, **45**, 3: 102–112.
- BUCHHOLD, M., GEBHARDT, C., THEIS, S. & BOUALLÈGUE, Z. B. (2014): *Das konvektionserlaubende Ensemblevorhersagesystem COSMO-DE-EPS – von der Entwicklung zu den Anwendungen*. In: *Kolloquium der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft*, 16.06.2014.
- CHANDWANI, V., VYAS, S. K., AGRAWAL, V. & SHARMA, G. (2015): *Soft computing approaches for rainfall-runoff modelling: A review*. In: *Aquatic Procedia*, **4**: 1054–1061.
- CHWALA, C. & KUNSTMANN, H. (2016): *Real-time data acquisition of commercial microwave link networks for hydrometeorological applications*. In: *Atmospheric Measurement Techniques*, **9**: 991–999.
- CLARK, R. A., GOURLEY, J. J., FLAMIG, Z. L., HONG, Y. & CLARK, E. (2014): *CONUS-Wide Evaluation of National Weather Service Flash Flood Guidance Products*. In: *Journal of the American Meteorological Society*, **29**, 2: 377–392.
- COCHRAN, W. G. (1977): *Sampling Techniques*. 3. Aufl. John Wiley and Sons New York.
- COLLIER, C. G. (2007): *Flash flood forecasting: What are the limits of predictability?* In: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **133**, 622: 3–23.
- COLLIER, C. G. & FOX, N. I. (2003): *Assessing the flooding susceptibility of river catchments to extreme rainfall in the United Kingdom*. In: *International Journal of River Basin Management*, **1**, 3: 225–235.
- CULLMANN, J. (2007): *Online flood forecasting in fast responding catchments on the basis of a synthesis of artificial neural networks and process models*. Dissertation, TU Dresden, Institut für Hydrologie.
- CULLMANN, J., KRAUSSE, T. & PHILIPP, A. (2008): *Enhancing Flood Forecasting with the Help of Processed*

- Based Calibration. In: Physics and Chemistry of the Earth, **33**, 17-18: 1111–1116.
- CULLMANN, J., KRAUSSE, T. & PHILIPP, A. (2009): *Communicating Flood Forecast Uncertainty under Operational Circumstances*. In: Journal of Flood Risk Management, **2**, 4: 306–314.
- CULLMANN, J., KRAUSSE, T. & SAILE, P. (2011): *Parameterising hydrological models – Comparing optimisation and robust parameter estimation*. In: Journal of Hydrology, **404**, 3–4: 323–331.
- DALE, M., DEMPSEY, P. & DENT, J. (2004): *Extreme Rainfall Event Recognition: Phase 2 Work, Package 5: Establishing a User Requirement for a Decision-Support Tool*. Techn. Ber., Environment Agency Flood and Coastal Defence R&D Programme.
- DAVIS, R. S. (2001): *Severe Convective Storms*, Kap. Flash Flood Forecast and Detection Methods, 481–525. 3. Aufl. American Meteorological Society.
- DEMUTH, N. (2015): *Hochwasserfrühwarnung für kleine Einzugsgebiete in Rheinland-Pfalz*. In: *Projektworkshop Chancen und Grenzen der Hochwasserfrühwarnung für kleine Einzugsgebiete in Sachsen, Dresden, 26. bis 27.11.2015*.
- DOBMAN, J. (2009): *Hochwasserabschätzung in kleinen Einzugsgebieten der Schweiz*. Dissertation, Geographisches Institut der Universität Bern.
- DUAN, Q. Y., AJAMI, N. K., GAO, X. G. & SOROOSHIAN, S. (2007): *Multi-model ensemble hydrologic prediction using Bayesian model averaging*. In: Advances in Water Resources, **30**, 5: 1371–1386.
- DWD (2004): *Projekt RADOLAN – Routineverfahren zur Online-Aneicherung der Radarniederschlagsdaten mit Hilfe von automatischen Bodenniederschlagsstationen (Ombrometer)*. Techn. Ber., Deutscher Wetterdienst.
- DWD (2012): *Projekt RADVOR-OP – Radargestützte, zeitnahe Niederschlagsvorhersage für den operationellen Einsatz (Niederschlag-Nowcasting-System)*. Techn. Ber., Deutscher Wetterdienst.
- DWD (2015): *Radarniederschlag – Prinzip der Niederschlagsbestimmung mit Radar inklusive Umrechnung der Radarreflektivitäten in Momentanwerte des Niederschlages*. Techn. Ber., Deutscher Wetterdienst.
- DWD (2016): *Erstellung einer radargestützten Niederschlagsklimatologie – 2. Sachstandsbericht*. Techn. Ber., Deutscher Wetterdienst.
- DYCK, S. [Hrsg.] (1978): *Angewandte Hydrologie (Teil 2): Der Wasserhaushalt der Flussgebiete*. Verlag für Bauwesen Berlin.
- EDWARDS, D. & MCKEE, T. (1997): *Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales*. In: Atmospheric Science Paper, **634**, 97-2: 1–155.
- EHRET, U., GÖTZINGER, J., BÁRDOSSY, A. & PEGRAM, G. G. S. (2008): *Radar-based flood forecasting in small catchments, exemplified by the Goldersbach catchment, Germany*. In: International Journal of River Basin Management, **6**, 4: 323–329.
- ERLER, R., SCHAARSCHMIDT, I., SCHWARZE, R. & WAGNER, M. (2011): *HWRESA – Entwicklung einer neuen Hochwasserstatistik für Sachsen durch gekoppelte Auswertung meteorologisch-hydrologischer Daten im regionalen Bezug (Abschlussbericht)*. Techn. Ber., Institut für Hydrologie und Meteorologie, Technische Universität Dresden.
- FAWCETT, T. (2006): *An introduction to ROC analysis*. In: Pattern Recognition Letters, **27**, 8: 861–874.
- FENICIA, F., KAVETSKI, D. & SAVENIJE, H. H. G. (2011): *Elements of a flexible approach for conceptual hydrological modeling: 1. Motivation and theoretical development*. In: Water Resources Research, **47**, 11: 1–13.
- FICKERT, R. (1932a): *Das Hochwasser im Sächsischen Schwarzwassergebiet am 6. Juni 1931*. In: Deutsche Wasserwirtschaft, **2-3**: 1–11.
- FICKERT, R. (1932b): *Die Hochwässer in der Sächsischen Lausitz im Juni 1926 und Oktober/November 1930*. In: Wasserkraft und Wasserwirtschaft, **21–23**: 84–95.
- FICKERT, R. (1936): *Das Hochwasser im Pließnitzgebiet am 14. Juli 1932*. Beilage zum Jahrbuch des Sächsischen Amtes für Gewässerkunde 1936, Sächsisches Amt für Gewässerkunde.
- FICKERT, R. & SCHMIDT, K. (1934): *Die größten Sommerhochwässer des sächsischen Muldegebietes in den letzten Jahrzehnten mit einer Darstellung der Großwetterlagen*. Beilage zum Jahrbuch des Sächsischen Amtes

- für Gewässerkunde 1934, Sächsisches Amt für Gewässerkunde.
- FLACH, E. & FICKERT, R. (1936): *Die Hochwasserkatastrophe im oberen Gebiet der Weißen Elster am 23. Mai 1935*. Beilage zum Jahrbuch des Sächsischen Amtes für Gewässerkunde 1936, Sächsisches Amt für Gewässerkunde.
- FRICK, J. & HEGG, C. (2011): *Can end-users' flood management decision making be improved by information about forecast uncertainty?* In: Atmospheric Research, **100**, 2-3: 296–303.
- FRICK, J., KAISER, F. G. & WILSON, M. (2004): *Environmental knowledge and conservation behavior: exploring prevalence and structure in a representative sample*. In: Journal of Personality and Individual Differences, **37**, 8: 1597–1613.
- GEBHARDT, C., THEIS, S., BUCHHOLD, M., BOUALLÈGUE, Z. B., PERALTA, C., PAULAT, M. & RÖPNAK, A. (2013): *COSMO-DE-EPS – Vorhersageunsicherheit meteorologischer Parameter auf kurzen Zeit- und Raumskalen*. In: BfG Kolloquium, 24./25.09.2013.
- GIGERENZER, G., HERTWIG, R., VAN DEN BROEK, E., FASOLO, B. & KATSIKOPOULOS, K. V. (2005): *A 30 percent chance of rain tomorrow: how does the public understand probabilistic weather forecasts?* In: Risk Analysis, **25**, 3: 623–629.
- GIRONS LOPEZ, M., DI BALDASSARRE, G. & SEIBERT, J. (2016): *Impact of social preparedness on flood early warning systems*. In: Water Resources Research, **52**, 12: 522–534.
- GREEN, C. H., TUNSTALL, S. & FORDHAM, M. H. (1991): *The risks from flooding: which risks and whose perception?* In: Disasters, **15**, 3: 227–236.
- GROVES, R. M. (2009): *Survey Methodology*. 2. Aufl. John Wiley and Sons Hoboken.
- GRUNDMANN, J. (2010): *Analyse und Simulation von Unsicherheiten in der flächendifferenzierten Niederschlags-Abfluss-Modellierung*. Dissertation, TU Dresden, Institut für Hydrologie.
- GUPTA, H. V., KLING, H., YILMAZ, K. K. & MARTINEZ, G. F. (2009): *Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: implications for improving hydrological modelling*. In: Journal of Hydrology, **377**, 1: 80–91.
- HAGAN, M. T., DEMUTH, H. B., BEALE, N. & DE JESUS, O. (2002): *Neural Network Design*. 2nd Aufl. Published by Martin Hagan.
- HANSEN, N. & OSTERMEIER, A. (2001): *Completely derandomized self-adaptation in evolution strategies*. In: Evolutionary Computation, **9**, 2: 159–195.
- HAPUARACHCHI, H., WANG, Q. & PAGANO, T. (2011): *A review of advances in flash flood forecasting*. In: Hydrological Processes, **25**, 18: 2771–2784.
- HEISTERMANN, M., JACOBI, S. & PFAFF, T. (2013): *An open source library for processing weather radar data (WRADLIB)*. In: Hydrology and Earth System Sciences, **17**: 863–871.
- HERNÁNDEZ-LÓPEZ, M. R. & FRANCÉS, F. (2017): *Bayesian joint inference of hydrological and generalized error models with the enforcement of Total Laws*. In: Hydrology and Earth System Sciences, **9**: 1–39.
- HWMO (2015): *Verwaltungsvorschrift des Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landwirtschaft zum Hochwassernachrichten- und Alarmdienst im Freistaat Sachsen (Hochwassermeldeordnung – VwV HWMO) vom 12. Oktober 2015*.
- HWNVAO (2015): *Verordnung des Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landwirtschaft über den Hochwassernachrichten- und Alarmdienst im Freistaat Sachsen (HWNVAO) vom 29. September 2015*.
- ITZEROTT, S. (2010): *Operationelle Abfluss- und Hochwasservorhersage in Quellgebieten – OPAQUE (Abschlussbericht)*. Techn. Ber., Universität Stuttgart, Institut für Wasserbau; GFZ Potsdam, Sektionen 1.4 und 5.4; Universität Potsdam, Institut für Geoökologie; Schlaefer Mathematical Solutions & Engineering.
- JATHO, N., PLUNTKE, T., KURBJUHN, C. & BERNHOFER, C. (2010): *An approach to combine radar and gauge based rainfall data under consideration of their qualities in low mountain ranges of Saxony*. In: Natural Hazards and Earth System Sciences, **10**: 429–446.
- JESCHKE, K., GREIFF, B., KOLF, R., BURK, H.-P., MERKER, H., BOGATSCH, C., FRITZSCHE, C. & VOGEL, M.

- (2010): *Bericht der Kommission der Sächsischen Staatsregierung zur Analyse der Meldesysteme in Zusammenhang mit dem Augusthochwasser 2010*. Techn. Ber., Sächsische Staatsregierung.
- JOHST, M., DEMUTH, N. & MEUSER, A. (2016): *Risikoabschätzung und Risikokommunikation im Hochwassermeldedienst Rheinland-Pfalz*. In: Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, **37**: 295–302.
- KERL, F. & PHILIPP, A. (2015): *Verifikation von durch das Landeshochwasserzentrum Sachsen genutzten quantitativen DWD-Niederschlagsvorhersageprodukten für den Zeitraum 04/2011 bis einschließlich 06/2014*. Techn. Ber., Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.
- KERL, F., PHILIPP, A., METZKES, C., SINGER, T., WAGNER, M., SCHÜTZE, N. & MÜLLER, U. (2016): *Kleinräumige Hochwasserfrühwarnung im Lichte operationeller Anforderungen: Chancen und Grenzen bezüglich Nutzeransprüchen, Antriebsdaten sowie hydrologischer Modellsätze*. In: Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, **37**: 281–294.
- KIRCHBACH, H.-P., FRANKE, S., MINNICH, L., EPPLE, M., SCHÄFER, F., UNNASCH, F. & SCHUSTER, M. (2002): *Bericht der Unabhängigen Kommission der Sächsischen Staatsregierung zur Flutkatastrophe 2002*. Techn. Ber., Sächsische Staatsregierung.
- KIRCHBACH, H.-P., POPP, T. & SCHRÖDER, J. (2013): *Bericht der Kommission der Sächsischen Staatsregierung zur Untersuchung der Flutkatastrophe 2013*. Techn. Ber., Sächsische Staatsregierung.
- KLEIN, B., MEISSNER, D., HEMRI, S. & LISNIAK, D. (2016): *Ermittlung der prädiktiven Unsicherheit von hydrologischen Ensemblevorhersagen*. Techn. Ber. BfG-1853, Bundesanstalt für Gewässerkunde.
- KLING, H., FUCHS, M. & PAULIN, M. (2012): *Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios*. In: Journal of Hydrology, **424**, 1: 264–277.
- KNEIS, D., BÜRGER, G. & BRONSTERT, A. (2012): *Evaluation of medium-range runoff forecasts for a 50 sqkm watershed*. In: Journal of Hydrology, **414–415**: 341–353.
- KNEIS, D. & HEISTERMANN, M. (2009): *Bewertung der Güte einer Radar-basierten Niederschlagsschätzung am Beispiel eines kleinen Einzugsgebietes*. In: Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, **53**, 3: 160–171.
- KRAUSSE, T. (2013): *Robust parameter estimation – chances for hydrologic modelling in uncertain conditions*. IHP/HWRP-Berichte 11, IHP/HWRP-Sekretariat Koblenz.
- KRAUSSE, T., CULLMANN, J., SAILE, P. & SCHMITZ, G. H. (2012): *Robust multi-objective calibration strategies – chances for improving flood forecasting*. In: Hydrology and Earth System Sciences, **16**: 3579–3606.
- KRONENBERG, R. S. (2014): *On the derivation of spatial highly resolved precipitation climatologies under consideration of radar-derived precipitation rates*. Dissertation, Technische Universität Dresden.
- KUNDZEWICZ, Z. (2013): *Late lessons from early warnings: science, precaution, innovation – Part B: Emerging lessons from ecosystems – Chapter Floods: lessons about early warning systems*. EFA Reports 1/2013, European Environment Agency.
- LEINER, D. (2013): *SoSci Survey – Programmpaket zur Gestaltung und Organisation von Online-Fragebögen*. <https://www.soscisurvey.de>.
- LFU (2016): *Starkregen und Hochwasser in Rheinland-Pfalz im Mai/Juni 2016*. Techn. Ber., Landesamt für Umwelt, Rheinland-Pfalz.
- LFUG (2004): *Ereignisanalyse Hochwasser August 2002 in den Osterzgebirgsflüssen*. Techn. Ber., Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie.
- LFULG (2009): *Hochwasser 2002 im Muldegebiet*. Techn. Ber., Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.
- LFULG (2012): *Flächenhafte Bestimmung von Hochwasserspenden*. Techn. Ber., Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.
- LFULG (2013a): *Ereignisanalyse Hochwasser im August und September 2010 und Januar 2011 in Sachsen*. Techn. Ber., Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.

- LFULG (2013b): *Gewässerkundlicher Monatsbericht mit vorläufiger Auswertung des Hochwassers Juni 2013*. Techn. Ber., Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.
- LFULG (2015): *Ereignisanalyse Hochwasser Juni 2013*. Techn. Ber., Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.
- LFULG (2016a): *Die größten Hochwasser im Einzugsgebiet der Mulde im meteorologisch-hydrologischen Vergleich*. Techn. Ber., Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.
- LFULG (2016b): *Fachkonzept IT-Vorhaben: Konzeption, Implementierung und Operationalisierung einer Perspektive zur Hochwasserfrühwarnung in KALYPSO*. Techn. Ber., Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.
- LFULG (2016c): *Leistungsbeschreibung IT-Vorhaben: Konzeption, Implementierung und Operationalisierung einer Perspektive zur Hochwasserfrühwarnung in KALYPSO*. Techn. Ber., Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.
- LI, Y., RYU, D., WESTERN, A. W. & WANG, Q. J. (2015): *Assimilation of stream discharge for flood forecasting: Updating a semidistributed model with an integrated data assimilation scheme*. In: *Water Resources Research*, **51**, 1: 3238–3258.
- LIECHTI, K., PANZIERA, L., GERMANN, U. & ZAPPA, M. (2013): *The potential of radar-based ensemble forecasts for flash-flood early warning in the southern Swiss Alps*. In: *Hydrology and Earth System Sciences*, **17**: 3853–3869.
- LISNIAK, D., MEISSNER, D., KLEIN, B. & PINZINGER, R. (2014): *Konzept zur Nachführung von Anfangszuständen eines operationellen hydrologischen Modells für die Verbesserung von Abflussvorhersagen*. In: *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, **58**, 2: 106–118.
- LOWRY, C. S. & FIENEN, M. N. (2013): *CrowdHydrology: Crowdsourcing Hydrologic Data and Engaging Citizen Scientists*. In: *Ground Water*, **51**, 1: 151–156.
- LUBW (2013): *Hinweise zur regionsbezogenen Hochwasserfrühwarnung der Hochwasservorhersagezentrale der LUBW für Gewässer mit Einzugsgebieten unter 200 Quadratkilometern*. Techn. Ber., Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg.
- MANI, P., DOBMANN, J., LÜTHI, A. & GERBER, B. (2012): *Frühwarnsystem für kleine Einzugsgebiete – ein Dispositionsansatz*. In: *Proceedings of the 12th INTRA-PREVENT Conference*.
- MATREATA, S. & MATREATA, M. (2006): *Application of fuzzy logic systems for the elaboration of an operational hydrological warning system in ungauged basins*. In: *Proceedings of the 11th Conference of the Euromediterranean Network of Experimental and Representative Basins (ERB)*, 157–162. Luxembourg.
- MAZZOLENI, M., VERLAAN, M., ALFONSO, L., MONEGO, M., NORBIATO, D., FERRI, M. & SOLOMATINE, D. (2017): *Can assimilation of crowdsourced data in hydrological modelling improve flood prediction?* In: *Hydrology and Earth System Sciences*, **21**: 839–861.
- MCANDREW, F. T. (1993): *Environmental Psychology*. 1. Aufl. Brooks/Cole Pacific Grove.
- MCCARTHY, S. (2007): *Contextual influences on national level flood risk communication*. In: *Environmental Hazards*, **7**, 2: 128–140.
- MCCARTHY, S., TUNSTALL, S., PARKER, D., FAULKNER, H. & HOWE, J. (2007): *Risk communication in emergency response to a simulated extreme flood*. In: *Environmental Hazards*, **7**, 3: 179–192.
- MEERVELD, I., VIS, M. & SEIBERT, J. (2017): *Information content of stream level class data for hydrological model calibration*. In: *Hydrology and Earth System Sciences (in Discussion)*.
- MERZ, B., BITTNER, R. & GÜNTHER, K. (2009): *RIMAX (Risikomanagement extremer Hochwasserereignisse) – Ergebnisse aus der Hochwasserforschung*. 1. Aufl. Deutsches GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ).
- METZKES, C. (2016): *Entwicklung und Anwendung von robusten Bewertungsansätzen für die frühzeitige Abschätzung der Hochwasserneigung in kleinen (submesoskaligen) Einzugsgebieten in Sachsen*. Masterarbeit, Institut für Hydrologie und Meteorologie, Technische Universität Dresden.

- MEYLAN, P., FAVRE, A.-C. & MUSY, A. [Hrsg.] (2012): *Predictive Hydrology – A Frequency Analysis Approach*. Science Publishers.
- MÜLLER, U. (2010): *Hochwasserrisikomanagement – Theorie und Praxis*. Springer Vieweg.
- MÜLLER, U., PHILIPP, A. & HÄRTA, R. (2016): *Das neue Hochwasserinformations- und Hochwassermanagementsystem in Sachsen*. In: Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, **37**: 339–351.
- MÜLLER, U. & WALTHER, P. (2011): *Das Weiße-Hochwasser 2010 – Analyse und Konsequenzen*. In: Wasserwirtschaft, **101**, 11: 10–14.
- MORÉ, J. J. (1978): *The Levenberg-Marquardt algorithm: implementation and theory*. In: WATSON, G. A. [Hrsg.]: *Numerical analysis*, Proceedings of the Biennial Conference Held at Dundee, June 28–July 1, 1977, 105–116. Springer.
- MORSS, R. E., DEMUTH, J. L. & LAZO, J. K. (2008): *Communicating uncertainty in weather forecasts: a survey of the U.S. public*. In: Weather and Forecasting, **23**, 5: 974–991.
- NASH, J. E. & SUTCLIFFE, J. V. (1970): *River flow forecasting through conceptual models (Part I) – a discussion of principles*. In: Journal of Hydrology, **10**, 3: 282–290.
- NEMEC JR., J. [Hrsg.] (1986): *Hydrological Forecasting – Design and Operation of Hydrological Forecasting Systems*. D. Reidel Publishing Dordrecht.
- OFM (1972): *Hochwasserkatastrophe im Sommer 1972 im Raum Carlsfeld-Wildenthal*. Techn. Ber., Oberflussmeisterei Karl-Marx-Stadt.
- PAKOSCH, S. (2011): *Aufbau eines regelbasierten Expertensystems zur Hochwasserfrühwarnung*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Institut für Wasserwesen, Wasserwirtschaft und Ressourcenschutz.
- PAULAT, M. (2007): *Verifikation der Niederschlagsvorhersage für Deutschland von 2001 bis 2004*. Dissertation, Johannes-Gutenberg-Universität Mainz.
- PAVLOVIC, S., PERICA, S., ST LAURENT, M. & MEJIA, A. (2016): *Intercomparison of selected fixed-area areal reduction factor methods*. In: Journal of Hydrology, **537**: 419–430.
- PESCHKE, G., ETZENBERG, C., MÜLLER, G., TÖPFER, J. & ZIMMERMANN, S. (1999): *Das wissenschaftsbasierte System FLAB: Ein Instrument zur rechnergestützten Bestimmung von Landschaftseinheiten mit gleicher Abflussbildung*. Techn. Ber., IHI Zittau.
- PETERS, R. (2007): *Künstliche neuronale Netze zur Beschreibung der hydrodynamischen Prozesse für den Hochwasserfall unter Berücksichtigung der Niederschlags-Abfluß-Prozesse im Zwischeneinzugsgebiet*. Dissertation, TU Dresden, Institut für Hydrologie und Meteorologie.
- PETERS, T. (2008): *Ableitung einer Beziehung zwischen der Radarreflektivität, der Niederschlagsrate und weiteren aus Radardaten abgeleiteten Parametern unter Verwendung von Methoden der multivariaten Statistik*. Dissertation, Fakultät für Physik der Universität (TH) Karlsruhe.
- PHILIPP, A., KERL, F., METZKES, C., SINGER, T., WAGNER, M., SCHÜTZE, N. & MÜLLER, U. (2016): *Small-scale (flash) flood early warning in the light of operational requirements: Opportunities and limits with regard to user demands, driving data, and hydrologic modeling techniques*. In: Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences, **373**: 201–208.
- PHILIPP, A., KERL, F. & MÜLLER, U. (2015): *Ansprüche potentieller Nutzer an ein Hochwasserfrühwarnsystem für Sachsen*. In: Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, **59**, 1: 4–22.
- PHILIPP, A., SCHMITZ, G. H., CULLMANN, J. & KRAUSSE, T. (2008): *Flash Flood Forecasting Combining Meteorological Ensemble Forecasts and Uncertainty of Initial Hydrological Conditions*. In: Australian Journal of Water Resources, **12**, 3: 257–267.
- PIANI, C., HAERTER, J. O. & COPPOLA, E. (2009): *Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe*. In: Theoretical and Applied Climatology, **99**, 1: 187–192.
- PIANI, C., WEEDON, G., BEST, M., GOMES, S., VITERBO, P., HAGEMANN, S. & HAERTER, J. (2010): *Statistical bias correction of global simulated daily precipitation and temperature for the application of hydrological models*. In: Journal of Hydrology, **395**, 3: 199–215.

- PLUNTKE, T., JATHO, N., KURBJUHN, C., DIETRICH, J. & BERNHOFER, C. (2010): *Use of past precipitation data for regionalisation of hourly rainfall in the low mountain ranges of Saxony, Germany*. In: *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **10**: 353–370.
- POHL, R. (2003): *Hochwasser im Erzgebirge in der Vergangenheit*. Techn. Ber., TU Dresden, Institut für Wasserbau.
- POMEROY, J. W., WHITFIELD, P. H. & SPENCE, C. [Hrsg.] (2013): *Putting Prediction in Ungauged Basins Into Practice*. Canadian Water Resources Association Ottawa.
- RABIEI, E., HABERLANDT, U., SESTER, M. & FITZNER, D. (2013): *Rainfall estimation using moving cars as rain gauges – laboratory experiments*. In: *Hydrology and Earth System Sciences*, **17**: 4701–4712.
- RAUTHE, M., WINTERRATH, T., JAMES, P. & THEIS, S. (2015): *Verifikationsergebnisse: Radar-, NowCastMix und NWV-Produkte des DWD*. In: *Projektworkshop Chancen und Grenzen der Hochwasserfrühwarnung für kleine Einzugsgebiete in Sachsen, Dresden, 26. bis 27.11.2015*.
- RAYNAUD, D., THIELEN-DEL POZO, J., SALAMON, P., BUREK, P., ANQUETIN, S. & ALFIERI, L. (2014): *A dynamic runoff co-efficient to improve flash flood early warning in Europe: evaluation on the 2013 Central European floods in Germany*. In: *Meteorological Applications*, **22**, 3: 410–418.
- RENN, O. (2008): *Concepts of Risk: An Interdisciplinary Review*. In: *GAIA*, **17**, 1: 50–66.
- ROBERTS, N. & LEAN, H. (2008): *Scale-selective verification of rainfall accumulations from high-resolution forecasts of convective events*. In: *Monthly Weather Review*, **136**, 1: 78–97.
- SACHS, L. (1999): *Angewandte Statistik*. 9. Aufl. Springer Berlin Heidelberg.
- SAUER, C. (2017): *Konzeption sowie prototypische Implementierung und Anwendung eines mittels Crowdsourcing-Informationen konditionierbaren Soft-Computing basierten Hochwasserfrühwarnsystems für kleine, schnell reagierende Einzugsgebiete Sachsens*. Masterarbeit, Institut für Hydrologie und Meteorologie, Technische Universität Dresden.
- SCHERRER, S. & NAEF, F. (2003): *A decision scheme to indicate dominant hydrological flow processes on temperate grassland*. In: *Hydrological processes*, **17**, 2: 391–401.
- SCHMITZ, G. H., CULLMANN, J., PHILIPP, A., KRAUSSE, T. & LENNARTZ, F. (2008): *Nutzung künstlicher neuronaler Netze zur Bereitstellung von Entscheidungsgrundlagen für operative und planerische wasserwirtschaftliche Maßnahmen*. In: *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, **52**, 4: 187–197.
- SCHNELL, R., HILL, P. & ESSER, E. (2013): *Methoden der empirischen Sozialforschung*. 10. Aufl. Oldenbourg München.
- SCHÜTZE, N., METZKES, C. & WAGNER, M. (2017): *Endbericht Hochwasservorhersage zur kleinräumigen Frühwarnung in Sachsen – Flächendeckende Anwendung, Vergleich von zu erwartenden Vorhersagegütern sowie Bewertung der räumlichen Übertragbarkeit von deterministischen, datengetriebenen sowie Scoring-Modellen für den Anwendungsfall der HW-Frühwarnung für kleine Einzugsgebiete in Sachsen*. Techn. Ber., Institut für Hydrologie und Meteorologie, Technische Universität Dresden.
- SCHÜTZE, N., SINGER, T. & WAGNER, M. (2016): *Endbericht Niederschlagsverifikation – Verifikation probabilistischer quantitativer Niederschlagsvorhersageprodukte (QPF) im Hinblick auf deren Eignung als Antrieb für ein Hochwasserfrühwarnsystem für kleine Einzugsgebiete in Sachsen*. Techn. Ber., Institut für Hydrologie und Meteorologie, Technische Universität Dresden.
- SCHUMANN, A., BÜTTNER, U., THIEMIG, V., LECHTHALER, E., PFÜTZNER, B., DENHARD, M., TREPTE, S., DI PACE, S., DIETRICH, J., WANG, Y., HESSE, P., HINZ, N., POLTE, B., WALTHER, J., REDETSKY, U., M. DIETZSCH & MICHELS, I. (2009): *Entwicklung integrativer Lösungen für das operationelle Hochwassermanagement am Beispiel der Freiburger Mulde*. Techn. Ber., Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Hydrologie, Wasserwirtschaft und Umwelttechnik.
- SCHWARZE, R., HAUFFE, C., BALDY, A., WINKLER, P., DRÖGE, W., WAGNER, M. & RÖHM, P. (2014): *KliWES – Klimawandel und Wasserhaushalt in Sachsen: Wasserhaushaltsberechnungen für den Ist-Zustand und verschiedene Klima- bzw. Landnutzungsszenarien*. Schrif-

- tenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie des Freistaates Sachsen 32/2014, LfULG.
- SCHWARZE, R., SINGER, T., STANGE, P., WAGNER, M. & SCHÜTZE, N. (2015): *Zwischenbericht Hochwasservorhersage zur kleinräumigen Frühwarnung in Sachsen – Entwicklung und beispielhafte Anwendung von deterministischen sowie datengetriebenen Methoden zur hydrologischen Vorhersage und Prognose in kleinen, teilweise unbeobachteten Einzugsgebieten für die Ableitung von Hochwasserfrühwarnungen*. Techn. Ber., Institut für Hydrologie und Meteorologie, Technische Universität Dresden.
- SENE, K. [Hrsg.] (2010): *Hydrometeorology – Forecasting and Applications*. Springer.
- SHERMAN, L. K. (1932): *Streamflow from rainfall by the unit-graph method*. In: Eng. News Record, **108**: 501–505.
- SIEGRIST, M. & CVETKOVICH, G. (2000): *Perception of hazards: the role of social trust and knowledge*. In: Risk Analysis, **20**, 5: 713–719.
- SIEGRIST, M., GUTSCHER, H. & EARLE, T. C. (2006): *Perception of risk: the influence of general trust, and general confidence*. In: Journal of Risk Research, **8**, 2: 145–156.
- SINGER, T. (2015): *Konzeption, Implementierung und vergleichende Anwendung von Soft-Computing-Ansätzen für die Hochwasserfrühwarnung in sub-mesoskaligen Einzugsgebieten*. Masterarbeit, Institut für Hydrologie und Meteorologie, Technische Universität Dresden.
- SMUL (2002): *Materialien zur Wasserwirtschaft: Hochwasserschutz in Sachsen*. Techn. Ber., Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft.
- T-MMS (2015): *Datenverarbeitungskonzept HWIMS*. Techn. Ber., T-Systems Multimedia Solutions GmbH Dresden.
- TERPSTRA, T. (2011): *Emotions, trust, and perceived risk: affective and cognitive routes to flood preparedness behavior*. In: Risk Analysis, **31**, 10: 1658–1675.
- TESSENDORF, A. & EINFALT, T. (2011): *Ensemble radar nowcasts – a multi-method approach*. In: *Proceedings of Weather Radar and Hydrology Symposium, Exeter, England*. IAHS.
- THEIS, S., GEBHARDT, C. & BOUALLÈGUE, Z. B. (2015): *Beschreibung des COSMO-DE-EPS und seiner Ausgabebank in die Datenbanken des DWD*. Techn. Ber. Version 2.0, Deutscher Wetterdienst, Geschäftsbereich Forschung und Entwicklung.
- TODINI, E. (2004): *Role and treatment of uncertainty in real-time flood forecasting*. In: Hydrological Processes, **18**, 3: 2743–2746.
- TODINI, E. (2016): *Handbook of Applied Hydrology*, Kap. Predictive Uncertainty Assessment and Decision Making – Theory and Applications. 2. Aufl. McGraw-Hill.
- TODINI, E. (2017): *Flood Forecasting and Decision Making in the new Millennium. Where are We?* In: Water Resources Management, **7**, 1: 1–19.
- UCAR (2010): *Flash Flood Early Warning System Reference Guide*. 1. Aufl. University Corporation for Atmospheric Research.
- USDA (1986): *Urban hydrology for small watersheds*. Techn. Ber., United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Conservation Engineering Division.
- VOGELBACHER, A. (2014): *Zuverlässigkeitsaussagen in der Praxis der Hochwasserwarnung und -vorhersage in Bayern*. In: Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, **58**, 2: 148–154.
- VON DER LIPPE, P. & KLADOBRA, A. (2002): *Repräsentativität von Stichproben*. In: Marketing, **24**, 1: 227–238.
- WAGNER, M. (2012): *Regionalisierung von Hochwasserscheiteln auf Basis einer gekoppelten Niederschlag-Abfluss-Statistik mit besonderer Beachtung von Extremereignissen*. Dissertation, Institut für Hydrologie und Meteorologie, Technische Universität Dresden.
- WEIGL, E. (2009): *Aktueller Sachstand und Ausblick zur quantitativen Niederschlagsbestimmung mittels Boden- und Radarmessungen*. Techn. Ber., Deutscher Wetterdienst.
- WETTERHALL, F., PAPPENBERGER, F., ALFIERI, L., CLOKE, H. L., THIELEN-DEL POZO, J., BALABANOVA, S., DAÑHELKA, J., VOGELBACHER, A., SALAMON, P., CARRASCO, I., CABRERA-TORDERA, A. J., CORZO-TOSCANO, M., GARCIA-PADILLA, M., GARCIA-SANCHEZ,

- R. J., ARDILOUZE, C., JURELA, S., TEREK, B., CSIK, A., CASEY, J., STANKUNAVIČIUS, G., CERES, V., SPROKKE-REEF, E., STAM, J., ANGHIEL, E., VLADIKOVIC, D., ALIONTE EKLUND, C., HJERDT, N., DJERV, H., HOLMBERG, F., NILSSON, J., NYSTRÖM, K., SUŠNIK, M., HAZLINGER, M. & HOLUBECKA, M. (2013): *HESS Opinions "Forecaster priorities for improving probabilistic flood forecasts"*. In: *Hydrology and Earth System Sciences*, **17**: 4389–4399.
- WILKS, D. S. (2011): *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Academic Press.
- WINTERRATH, T., BRENDL, C., SCHMITT, A., WALAWENDER, E., HAFFER, M. & WEIGL, E. (2016): *Erstellung einer dekadenradargestützten hoch-auflösenden Niederschlagsklimatologie für Deutschland zur Auswertung der rezenten Änderung des Extremverhaltens von Niederschlag: 2. Sachstandsbericht*. Techn. Ber., Deutscher Wetterdienst.
- WISNER, B., BLAICKIE, P., CANNON, T. & DAVIS, I. [Hrsg.] (2004): *At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters*. Routledge London and New York.
- WMO (2011): *Manual on Flood Forecasting and Warning*. 1072, 1. Aufl. World Meteorological Organization.

# Abbildungsverzeichnis

1.0.1	Gebietskulisse der Hochwasserereignisse 2002, 2010 und 2013 in Sachsen . . . . .	15
1.2.1	Verbindung zwischen Gefahr, Vulnerabilität und Risiko . . . . .	18
1.2.2	Modell der Einflussfaktoren des Risikos . . . . .	18
1.2.3	Hochwasserrisikomanagementzyklus . . . . .	19
1.3.1	Komponentenorientiertes Hochwasservorhersagemodell . . . . .	20
1.4.1	Das Vorhersageproblem (1) . . . . .	21
1.4.2	Das Vorhersageproblem (2) . . . . .	21
1.5.1	Dauer des schnellsten Abflussanstieges bis zur Überschwemmung . . . . .	23
1.6.1	Hochwasserfrühwarnung in Baden-Württemberg, Hessen und Rheinland-Pfalz . . . . .	25
1.6.2	Ansicht des ERIC-Flash-Flood-Warnprodukts . . . . .	26
1.6.3	Hochwasserwarnkarte für kleine und mittlere Einzugsgebiete in der Schweiz . . . . .	27
1.6.4	Beschreibung von Gefahrenstufe mit Verhaltensempfehlung . . . . .	27
1.6.5	Flash Flood Guidance für eine Andauer von sechs Stunden . . . . .	28
1.6.6	Warnkarte des Warndienstes Binnenhochwasser Hamburg . . . . .	28
1.6.7	Hochwasserfrühwarnkarte des privaten Wetterdienstes Kachelmann GmbH . . . . .	29
1.6.8	OpenLayers-basierte Ansicht von DWD-Warnungen . . . . .	29
2.0.1	Ganzheitliches Hochwasserfrühwarnsystem . . . . .	33
2.1.1	Sechsstündige Radar-QPEs für Sachsen . . . . .	34
2.1.2	Vergleich zweier 30-d-QPEs für Sachsen . . . . .	36
2.2.1	Modellansätze mit potentieller Eignung für die Hochwasserfrühwarnung . . . . .	37
2.2.2	Konzepte zur Flash-Flood-Vorhersage . . . . .	38
2.2.3	Illustration des Konzepts der Flash Flood Guidance . . . . .	38
2.2.4	Bewertung der vorgestellten Antriebe und Modellansätze. . . . .	41
2.3.1	Typisches operationelles Vorhersage-Setup . . . . .	41
2.3.2	Hindcasting zur Bewertung der Vorhersagegüte . . . . .	42
2.3.3	Vorhersage ohne/mit Biaskorrektur/Zustandsnachführung . . . . .	42
2.4.1	Beispiel eines ROC-Spaces . . . . .	46
2.4.2	Beispiel eines Reliability Diagrams . . . . .	48
2.4.3	Skizze zur Ableitung des CRPS . . . . .	49
2.5.1	Beispiel-Framework zur Bestimmung der prädiktiven Unsicherheit . . . . .	51
2.5.2	Vergleich Raw Ensemble mit probabilistischer Vorhersage . . . . .	52
2.7.1	Schwellenwertkarten aus COSMO-DE-EPS . . . . .	55
3.1.1	Übersicht lokaler sommerlicher Starkniederschlagsereignisse in Sachsen . . . . .	60
3.4.1	Untersuchungsschwerpunkte des Projekts . . . . .	63
3.4.2	Übersicht der Projektphasen . . . . .	67
3.4.3	Projektmanagement-Sicht auf den Projektablauf . . . . .	68
3.5.1	Tafelbild Projektworkshop . . . . .	70

5.1.1	Schritte der durchgeführten quantitativen Erhebung . . . . .	74
5.1.2	Zur Einordnung der befragten Nutzerstichprobe . . . . .	75
5.2.1	Nutzergruppenspezifische Darstellung der Rücklaufquoten . . . . .	79
5.2.2	Zusammenhang zwischen Vorhersagezeitraum der Herkunft der Antworten . . . . .	82
5.2.3	Zusammenhang zwischen Vorhersagezeitraum und der Einzugsgebietsgröße . . . . .	82
5.2.4	Histogramme der wichtigsten Befragungsergebnisse (Fragen 7 bis 10) . . . . .	84
5.2.5	Histogramme der wichtigsten Befragungsergebnisse (Fragen 11 bis 14) . . . . .	85
5.2.6	Räumliche Verteilung der am häufigsten gewünschten Vorhersagezeiträume . . . . .	86
6.1.1	Karte der Flussgebiete in Sachsen . . . . .	92
6.2.1	Karte der einbezogenen Niederschlagsstationen . . . . .	95
6.2.2	Quantilvorhersage für das Vorhersagegebiet Freiburger Mulde oberhalb 300 m ü. NN . . . . .	95
6.2.3	Beispielhafter Aufbau einer Quantilvorhersage . . . . .	96
6.2.4	COSMO-DE-Koordinatengitter und Untersuchungsdomäne . . . . .	97
6.2.5	RADOLAN-Komposit und Untersuchungsdomäne . . . . .	97
6.3.1	Unterschiedliche zeitliche Diskretisierung der verschiedenen DWD-Produkte . . . . .	99
6.3.2	Relative Häufigkeit der Überschreitung von 2 mm in 6 h . . . . .	101
6.3.3	Q-Q-Plot für das Vorhersageprodukt COSMO-DE . . . . .	102
6.3.4	Streudiagramm des 10 %-Quantils der Quantilvorhersage im Sommerquartal . . . . .	103
6.3.6	Summenlinien des Vorhersagegebietes Zwickauer Mulde oberhalb 300 m ü. NN . . . . .	103
6.3.5	Streudiagramm der COSMO-DE-QPF im Gesamtzeitraum . . . . .	104
6.3.7	Boxplots des nRMSE über alle Vorhersagegebiete . . . . .	104
6.3.8	ROC-Curves für das Vorhersagegebiet Röder und Schwarze Elster . . . . .	106
6.3.9	Kumulierte Niederschlagsfelder (COSMO-DE, RADOLAN) Mai/Juni 2013 . . . . .	107
6.3.12	Abhängigkeit des relativen Fehlers von der Einzugsgebietsgröße . . . . .	107
6.3.10	Niederschlagssummen von 27.05.2013 bis 03.06.2013 . . . . .	108
6.3.11	Ganglinien der mittleren 6-h-Gebietsmittel . . . . .	108
6.4.1	Abhängigkeit des Equitable Threat Scores (ETS) vom Schwellenwert . . . . .	110
6.4.2	Abhängigkeit der Vorhersagegüte von der räumlichen Skala . . . . .	111
7.1.1	Schema zur Generierung der Member des COSMO-DE-EPS-Outputs . . . . .	113
7.2.1	Schema der angewendeten Flächenteilung zur Ableitung der Bilanzgebiete . . . . .	113
7.2.2	Lage der räumlichen Zuschnitte der untersuchten Produkte . . . . .	115
7.3.1	Methodik zur Erstellung der zu verifizierenden Zeitreihen . . . . .	116
7.3.2	MAE für stündliche Punktvorhersagen . . . . .	116
7.3.3	RMSE und nRMSE für stündliche Punktvorhersagen . . . . .	117
7.3.4	mBIAS für stündliche Punktvorhersagen . . . . .	119
7.3.5	Räumliche Verteilung des mBIAS . . . . .	120
7.3.6	AUC für stündliche Punktvorhersagen . . . . .	121
7.3.7	AUCEPS für COSMO-DE-EPS . . . . .	122
7.3.8	Reliability-Diagramme für das COSMO-DE-EPS-Produkt . . . . .	123
7.3.9	CRPS für stündliche Punktvorhersagen . . . . .	124
7.3.10	Räumliche Verteilung des CRPS . . . . .	124
8.1.1	Übersicht Untersuchungsgebiete (I/II) . . . . .	126
8.1.2	Übersicht Untersuchungsgebiete (II/II) . . . . .	127
8.1.3	Histogramm der Einzugsgebietsgrößen der untersuchten Gebiete . . . . .	130
8.1.4	Zur Illustration des Begriffs „Persistenzvorhersage“ . . . . .	132

8.2.1	Modelloutputs von DeHM, DaHM und ScoHM . . . . .	134
8.2.2	Modellvalidierung für den Pegel Porschdorf 1/Lachsbach . . . . .	135
8.2.3	Modellvalidierung über alle Pegeleinzugsgebiete . . . . .	135
8.2.4	Modellvalidierung: Gütemaße abhängig von $A_E$ . . . . .	136
8.2.5	Modellverifikation für den Pegel Porschdorf 1/Lachsbach . . . . .	137
8.2.6	Modellverifikation über alle Pegeleinzugsgebiete . . . . .	137
8.2.7	Modellverifikation: Gütemaße abhängig von $A_E$ . . . . .	138
8.3.1	Ergebnisse der Regionalisierungsstudie . . . . .	142
11.1.1	Screenshot KALYPSO-Perspektive „Frühwarnung“ . . . . .	150
11.3.1	Ablauf der fachlichen Datenverarbeitung bei der Hochwasserfrühwarnung . . . . .	154
11.3.2	Beispiel der Aggregation mittels WARNSIM-Methodik . . . . .	156
11.3.3	Beispiel Lage- und Formparameter für den SPI . . . . .	158
11.3.4	Probleme bei der Niederschlagsklimatologie auf Basis von Radardaten. . . . .	158
11.3.5	Methodik zur Ableitung einer sub-täglichen Niederschlagsklimatologie . . . . .	159
11.3.6	Ampelkarte auf Leaflet-Basis . . . . .	162
11.4.1	Ampelkarte aus KALYPSO . . . . .	162
12.1.1	Kontextsicht KALYPSO und HWIMS . . . . .	165
12.2.1	Darstellung eines Frühwarnprodukts via des LHWZ-Webportals . . . . .	166
12.2.2	Bedeutung der Gefährdungsklassen . . . . .	167
12.4.1	Aus RADOLAN-RW gebildete 8-h-Summe für den 31.05.2016 . . . . .	170
12.4.2	Frühwarn-Ampelkarte für 31.05.2016, 12:00 Uhr MESZ . . . . .	170
12.4.3	DWD-Warnlagebericht Sachsen für Dienstag, 31.05.2016, 10:30 Uhr MESZ . . . . .	170
12.4.4	Aus RADOLAN-RW gebildete 6-h-Summe für den 31.07.2016 . . . . .	171
12.4.5	Screenshot Freie Presse Online vom 31.07.2016 . . . . .	171
12.4.6	Frühwarn-Ampelkarte für 31.07.2016, 12:00 Uhr MESZ . . . . .	171
12.4.7	Aus RADOLAN-RW gebildete 24-h-Summe für den 28.12.2016 . . . . .	172
12.4.8	Frühwarn-Ampelkarte für 28.12.2016, 07:00 Uhr MEZ . . . . .	172
12.4.9	Übersicht Warnstatus an den sächsischen Hochwassermeldepegeln für den 28. und 29.12.2016 . . . . .	172
12.4.10	Frühwarn-Ampelkarte für 22.02.2017, 07:00 Uhr MEZ . . . . .	173
12.4.11	Übersicht Warnstatus an den sächsischen Hochwassermeldepegeln für den 22. und 23.02.2017 . . . . .	173
12.4.12	DWD-Warnlagebericht Sachsen für Sonntag, 14.05.2017, 10:30 Uhr MESZ . . . . .	173
12.4.13	Aus RADOLAN-RW gebildete 5-h-Summe für den 14.05.2017 . . . . .	174
12.4.14	Eindruck des Ereignisses vom 14.05.2017 in Spitzkunnersdorf . . . . .	174
12.4.15	DWD-Verfahren KONRAD für 14.05.2017, 13:50 Uhr MESZ . . . . .	174
12.4.16	Frühwarn-Ampelkarte für 14.05.2017, 12:00 Uhr MESZ . . . . .	175
12.4.17	24-stündige Radar-QPEs 28./29.06.2017 . . . . .	176
12.4.18	Artikel der Sächsischen Zeitung vom 30.06.2017 . . . . .	176
12.4.19	Frühwarnkarten und Warnstatus für das Ereignis 28./29.06.2017 . . . . .	177
12.4.20	Aus RADOLAN-RW gebildete 24-h-Summe für den 10./11.07.2017 . . . . .	178
12.4.21	Frühwarn-Ampelkarte für 10.07.2017, 05:00 Uhr MESZ . . . . .	178
12.4.22	Übersicht Warnstatus an den sächsischen Hochwassermeldepegeln für den 10.07.2017 . . . . .	178
12.4.23	Aus RADOLAN-RW gebildete 24-h-Summe für den 11./12.07.2017 . . . . .	179
12.4.24	Frühwarn-Ampelkarten für 11.07.2017, 08:00 Uhr MESZ . . . . .	179
12.4.25	Übersicht Warnstatus an den sächsischen Hochwassermeldepegeln für den 11.07.2017 . . . . .	179
12.4.26	Aus RADOLAN-RW gebildete 24-h-Summe für den 12./13.07.2017 . . . . .	180

12.4.27	Frühwarn-Ampelkarten für 12.07.2017, 08:00 Uhr MESZ . . . . .	180
12.4.28	Aus RADOLAN-RW gebildete 72-h-Summe bis 27.07.2017, 07:50 Uhr MESZ . . . . .	181
12.4.29	Warnstatus der deutschen Hochwassermeldepegel in der Woche vom 24.07.2017 . . . . .	181
12.4.30	Frühwarn-Ampelkarten für 26.07.2017, 08:00 Uhr MESZ . . . . .	182
12.4.31	Aus RADOLAN-RW gebildete 06-h-Summe für den 01./02.08.2017 . . . . .	182
12.4.32	Frühwarn-Ampelkarten für den 01./02.08.2017 . . . . .	183
12.4.33	Gesamtscoreverlauf für das Vorhersagegebiet LN-O3 für fortlaufende Vorhersagezeitpunkte . . . . .	183
12.4.34	6-stündige Radar-QPEs 10./11.08.2017 . . . . .	184
12.4.35	Frühwarnkarten und Warnstatus für das Ereignis 10./11.08.2017 . . . . .	185
12.5.1	Entwurf Info-Flyer zum Hochwasserfrühwarnprodukt . . . . .	186
12.5.2	Szene aus dem Erklärfilm zur Hochwasserfrühwarnung . . . . .	186
14.3.1	Informationstafel des CrowdHydrology-Projekts . . . . .	192
14.3.2	Performanceverbesserung durch Nutzerrückmeldungen . . . . .	192
14.4.1	Modell zur Risikokommunikation . . . . .	194

# Tabellenverzeichnis

1.2.1	Einfluss bestimmter Maßnahmen des Hochwasserrisikomanagements . . . . .	19
1.6.1	Gegenüberstellung der vorgestellten Hochwasserfrühwarnsysteme . . . . .	30
2.0.1	Standard-Kontingenztafel zur binären Vorhersage . . . . .	32
2.1.1	Vor- und Nachteile verschiedener QPE-Verfahren . . . . .	36
2.4.1	Beispiel einer Kontingenztafel . . . . .	44
2.5.1	Übersicht von Verfahren der Unsicherheitsschätzung . . . . .	52
2.6.1	Hydrologische Modellansätze und ihr Potential für unbeobachtete Gebiete . . . . .	54
2.7.1	Regelwerk der WARNSIM-Methodik . . . . .	56
3.1.1	Übersicht schadensträchtiger kleinräumiger Hochwasserereignisse in Sachsen . . . . .	59
3.2.1	Ausgewählte Untersuchungen zur kleinräumigen hydrologischen Modellierung . . . . .	61
3.4.1	Projekttablauf chronologisch nach Projektphasen . . . . .	65
3.4.2	Meilensteine im Projekttablauf . . . . .	66
3.5.1	Teilnehmerliste Projektworkshop November 2015 . . . . .	69
5.1.1	Übersicht der im Fragebogen gestellten Fragen . . . . .	76
5.1.2	Übersicht über die Häufigkeit der Befragungssubjekte . . . . .	77
5.1.3	Beispiel einer Kontingenztafel aus der Befragung . . . . .	78
5.2.1	Assoziations- und Signifikanzmaße . . . . .	81
5.2.2	Übersicht zur Häufigkeit im Rahmen von Frage 15 erhobener Anmerkungen . . . . .	86
6.1.1	Übersicht Teilgebiete der gebietsbezogenen Quantilvorhersage . . . . .	92
6.2.1	Einbezogene DWD-Ombrometer und deren Datenverfügbarkeit . . . . .	94
6.3.1	Kontingenztafel für den Schwellenwert 5 mm in 6 h . . . . .	105
7.2.1	Übersicht der durch die Teilungsoperationen erhaltenen Bilanzgebiete . . . . .	113
7.2.2	Übersicht zu Eigenschaften der Untersuchungsdaten . . . . .	114
7.4.1	Vergleich der Verifikationsergebnisse für verschiedene Maßzahlen . . . . .	122
7.4.2	Gegenüberstellung von Vor- und Nachteilen bei der Verarbeitung von QPFs . . . . .	125
8.1.1	Gebietsübersicht (I/III) . . . . .	127
8.1.2	Gebietsübersicht (II/III) . . . . .	128
8.1.3	Gebietsübersicht (III/III) . . . . .	129
8.1.4	Übersicht der Datengrundlage bei der hydrologischen Modellierung . . . . .	129
8.1.5	Übersicht Bewertungsverfahren ScoHM . . . . .	132
8.1.6	Zuordnung von Hochwasserjährlichkeiten zum Gesamtscore . . . . .	133
8.3.1	Referenzpegel Regionalisierung DaHM und ScoHM . . . . .	140
8.3.2	Referenzpegel Regionalisierung DeHM . . . . .	140
8.4.1	Modellgegenüberstellung DeHM, DaHM und ScoHM . . . . .	143

11.2.1	Rollen und Zugriffsrechte . . . . .	150
11.2.2	Fachprozesse bei der Hochwasserfrühwarnung . . . . .	151
11.2.3	Detaillierte Fachprozesse der Hochwasserfrühwarnung . . . . .	152
11.2.4	Berechtigungen der Nutzerrollen . . . . .	153
11.3.1	Zuordnung eines Gefährdungstatus in Abhängigkeit vom Gesamtscore . . . . .	155
11.3.2	Für das Scoring-Verfahren angepasste WARNSIM-Methodik . . . . .	155
11.4.1	Gegenüberstellung der bisher vorgestellten Frühwarnsysteme mit dem neuen System . . . . .	163
12.3.1	Kontingenztafel Verifikation Prototyp Hochwasserfrühwarnsystem . . . . .	168
12.3.2	Gütemaße Verifikation Prototyp . . . . .	168
12.4.1	Übersicht der vorgestellten Einzelereignisse . . . . .	169
12.5.1	Produkte der Öffentlichkeitsarbeit . . . . .	186

# Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

## Dimensionen

[L]	Länge
[M]	Masse
[T]	Zeit
[–]	Dimensionslos
[ ]	Nicht weiter spezifiziert

## Lateinische Großbuchstaben

$A_E$	Einzugsgebietsgröße/-fläche . . . . .	$[L^2]$
$F$	(Kumulierte) Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion . . . . .	[ ]
$G$	Gefährdungsstatus eines Vorhersagegebiets . . . . .	[–]
$K$	Speicherrückgangskonstante . . . . .	[T]
$P$	Niederschlagssumme, -höhe . . . . .	$[L^3L^{-2}]$
$Q$	Durchfluss, Abfluss . . . . .	$[L^3T^{-1}]$
$R$	Niederschlagsrate . . . . .	$[L^3T^{-1}]$
$S$	Warnstatus . . . . .	[–]
$T$	Wiederkehrintervall . . . . .	[T]
$V$	Inhalt eines Einzellinearspeichers . . . . .	$[L^3]$
$Z$	Reflektivitätsfaktor (Radar) . . . . .	$[L^6L^{-3}]$

## Lateinische Kleinbuchstaben

$a$	Empirischer Parameter in der $Z$ - $R$ -Beziehung (Radar) . . . . .	[–]
$b$	Empirischer Parameter in der $Z$ - $R$ -Beziehung (Radar) . . . . .	[–]
$f$	Funktion (allgemein); Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion . . . . .	[ ]
$i$	Laufvariable, Zählvariable . . . . .	[–]
$n$	Anzahl, Stichprobenumfang . . . . .	[–]
$p$	Wahrscheinlichkeit . . . . .	[–]
$q$	Abflussspende . . . . .	$[L^3L^{-2}T^{-1}]$
$r$	Korrelationskoeffizient . . . . .	[–]
$t_c$	Konzentrationszeit . . . . .	[T]

**Griechische Kleinbuchstaben**

$\alpha$	Normierungsfläche . . . . .	[L <sup>2</sup> ]
$\beta$	Koeffizient bei der Abflusspendenübertragung . . . . .	[–]
$\delta$	Bias Ratio der KGE . . . . .	[–]
$\gamma$	Unvollständige Gammafunktion . . . . .	[ ]
$\mu$	Erwartungswert . . . . .	[ ]
$\nu$	Variability Ratio der KGE . . . . .	[–]
$\rho$	Parameter der Gammaverteilung . . . . .	[–]
$\sigma$	Standardabweichung . . . . .	[ ]

**Sonstiges**

$\mathcal{B}$	Beobachtung . . . . .	[ ]
$\mathcal{J}$	Inputvektor . . . . .	[ ]
$\mathcal{V}$	Vorhersage . . . . .	[ ]
Cov	Kovarianz . . . . .	[ ]
Var	Variationskoeffizient . . . . .	[–]

## Abkürzungen

ANN	Artificial Neural Network
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
BAFU	Schweizer Bundesamt für Umwelt
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BMA	Bayesian Model Averaging
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CMS	Content Management System
COSMO	Consortium for Small-Scale Modeling
CSI	Critical Success Index
CZ	Tschechien
DeHM	Deterministisches hydrologisches Modell (Eigenname)
DaHM	Datengetriebenes hydrologisches Modell (Eigenname)
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DWD	Deutscher Wetterdienst
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
EFAS	European Flood Awareness System
ELS	Einzellinearspeicher
EMOS	Ensemble Model Output Statistics
EPS	Ensemble Prediction System
EPSG	European Petroleum Survey Group Geodesy
ERIC	European Runoff Index Based on Climatology
ERICHA	European Rainfall-Induced Hazard Assessment System
ETS	Equitable Threat Score
ETRS	European Terrestrial Reference System
FAR	False Alarm Rate/Ratio
FFG	Flash Flood Guidance
FP(R)	False Positive (Rate)
FSAP	Flood Susceptibility Assessment Procedure
FTP	File Transfer Protocol
GFS	Global Forecasting System
GME	Globalmodell Europa
GRIB	Gridded Binary
HEPEX	Hydrologic Ensemble Prediction Experiment
HQ(T)	Hochwasserscheitelabfluss der Jährlichkeit T
HWFWS	Hochwasserfrühwarnsystem
HWIMS	Hochwasserinformations- und -managementsystem
HWMO	Hochwassermeldeordnung
HWNAVO	Hochwassernachrichten- und Alarmdienstverordnung
ICON	Icosahedral Nonhydrostatic Model
IDW	Inverse Distanzwichtung
JRC	EU Joint Research Centre Ispra
KGE	Kling-Gupta-Effizienz
KNN	Künstliches Neuronales Netz(werk)
KONRAD	DWD-Verfahren Konvektionsentwicklung in Radarprodukten
KOSTRA	Koordinierte Starkregenauswertung des DWD

LARSIM	Large Area Runoff Simulation Model
LEPS	Limited Area Ensemble Prediction System
LfU	Landesamt für Umwelt (Bayern und Rheinland-Pfalz)
LfULG	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
LHP	Länderübergreifendes Hochwasserportal
LHWZ	Landeshochwasserzentrum Sachsen
LISFLOOD	Model for the Simulation of Hydrological Processes in Large Basins
LLUR	Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein
LMK	Lokalmodell Kurzzeit
LUBW	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
MAE	Mean Absolute Error
mBIAS	Multiplicative Bias
MCMC	Markov-Chain-Monte-Carlo-Verfahren
N-A-Modell	Niederschlags-Abfluss-Modell
NLWKN	Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz
nRMSE	(Normalized) Root Mean Square Error
NSE	Nash-Sutcliffe-Effizienz
NWP	Numerical Weather Prediction
ÖA	Öffentlichkeitsarbeit
PL	Polen
POD	Probability of Detection
PUB	Prediction in Ungauged Basins
QPE	Quantitative Precipitation Estimate
QPF	Quantitative Precipitation Forecast
Q-Q-Plot	Quantil-Quantil-Plot
RADOLAN	Radar-Online-Aneichung
RADVOR	Radar-Niederschlagsvorhersage
REGNIE	Regionalisierte Niederschlagshöhen
RIMAX	Risikomanagement von Extremereignissen
ROC	Receiver Operating Characteristic
RSS	Really Simple Syndication
RWB(-LZ)	Regionale Wetterberatung (Leipzig) des DWD
SCIT	Storm Cell Identification and Tracking
ScoHM	Scoring-Modell zur hydrologischen Modellierung
SMUL	Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft
SPI	Standardized Precipitation Index
SPPM	Statistische Post-Prozessierungs-Methode
STRIMA	Sächsisch-Tschechisches Hochwasserrisikomanagement
TP(R)	True Positive (Rate)
TUD	Technische Universität Dresden
UCAR	University Corporation for Atmospheric Research
UFZ	Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung
UTC	Universal Time Coordinated
URM	Universale Transverse Mercatorprojektion
WMO	World Meteorological Organization
XML	Extensible Markup Language

# Stichwortverzeichnis

<b>A</b>		<b>D</b>	
Abfluss		Datenassimilation	41
-bildung	16	datengetriebenes Modell	38
-konzentration	16	Datenverarbeitungskonzept	150
Direktabfluss	17	deterministisches Modell	37
Gerinneabfluss	16	diagnostisch	41
kritischer Abfluss	38	diagnostische Variable	35
Oberflächenabfluss	17	dichotom	43
Accuracy	46	Dispersion	46
Adressat	17	Dispositionsmodell	39
Alarmstufe	20	Distrometer	34
Ampelkarte	30, 147	<b>E</b>	
Anfangs-Randwertproblem	40	EFAS	26
Anfangswertproblem	17	effektive Parameter	49, 52
Antwortausfallverzerrung	76	Einzellinearspeicher	42
Äquifinalität	49, 54	Ensemble	
Area Under Curve	45	-Techniken	35, 50
Assoziationsmaß	79	-vorhersage	50
<b>B</b>		Raw Ensemble	52
Bayes'sche Inferenz	50	Equitable Threat Score	44
bedingte Verteilung	50	Erhebung	
Best Forecast	129	qualitative	74
Bewertungsverfahren	39	quantitative	74
Bias	46	Erstellungszeitpunkt	17
-Korrektur	42	<b>F</b>	
Multiplicative Bias	45	False Negative	44
Black-Box-Modell	38	False Positive	44
<b>C</b>		False Positive Rate	44
Chi-Quadrat-Test	76	Fehler	42
Citizen Science	68, 190	-korrektur	42
Clutter	36	mittlerer absoluter Fehler	45
-fehler	116	Fernerkundung	
COSMO-DE-EPS	55	bodengestützte	33
Cramér's-V	76	luft- und raumgestützte	33
Critical Success Index	44	Flash Flood	16
Crowdsourcing	61, 190	Flash Flood Guidance	27
CRPS	46, 48	Flood Susceptibility Assessment	39

Fluvial Flood	16	Irrtumswahrscheinlichkeit	76
Frühwarnung	17	<b>K</b>	
Fragebogen	74	Künstliches Neuronales Netz	38
Frequenz-Magnituden-Beziehung	18	Kalibrierung	52
FSAPs	39	Kalman-Filter	43
Fuzzy		KALYPSO	147
Fuzzy-Logik	38	Klassifikationsverfahren	39
Fuzzy-Systeme	38	kleine Einzugsgebiete	16
<b>G</b>		Kling-Gupta-Effizienz	45
Ganglinienvorhersage	131	KliWES-Projekt	126
Gefährdung	18	KNN	38
Gefahr	18	Konsultation	191
Genauigkeit	46, 48	Kontingenztafel	43, 76
GeoJSON	154	Konzentrationszeit	16
Ground Truth	110	<b>L</b>	
Grundgesamtheit	76	Lead Time	17
<b>H</b>		Leaflet	160
Hindcast	41	LHWZ	14
Histogramm	78, 83	<b>M</b>	
Hochwasser		MCMC-Verfahren	51
-anfälligkeit	39, 40	Merkmale	
-bericht	20	nominale	74
-eilbenachrichtigung	20	ordinale	74
-frühwarnstrategie	32	Mesoskala	23
-frühwarnsystem	14	Modellphysik-Schema	110
-meldepegel	14	Monte-Carlo-Verfahren	50
-neigung	40	Multi-Model-Verfahren	51
-vorhersagemodell	20	Multiple Choice	84
-warnung	20	<b>N</b>	
Flusshochwasser	16	Nachführung	42
Hochwasserwarnung	20	Nachhersage	41
HWIMS	151	Nash-Sutcliffe-Effizienz	45
HWMO	20	Nesting	93
HWNAVO	20	Niederschlag	
hydrologische Modellierung		Niederschlagsverlauf	33
bewertungsbasierte	129	Schätzung	33
datengetriebene	128	Niederschlags-Abfluss-Modellierung	14
deterministische	128	Nowcasting-Verfahren	36
hydrologische Vorgeschichte	39	Numerische Wettervorhersage	35
Hypothesentest	76	NWP	35
<b>I</b>		<b>O</b>	
Infiltrationsüberschuss	16	Öffentlichkeitsarbeit	182
Information	191	Ombrometer	15, 33
Informationsvorsorge	19, 182		
Interview	74		

-messnetz . . . . .	41	Schaden	
Optimierung . . . . .	43, 49	Schadensfunktion . . . . .	18
<b>P</b>		Schadenspotential . . . . .	18
Partizipation . . . . .	191	Scheitelanstiegszeit . . . . .	16
Persistenzvorhersage . . . . .	130	Schutzmaßnahmen . . . . .	19
Perturbation . . . . .	35, 51	SCS-Verfahren . . . . .	54
Pluvial Flood . . . . .	17	Sensitivität . . . . .	44
Post-Prozessierungs-Methoden . . . . .	50	Sharpness . . . . .	46
Preparedness . . . . .	19	Signifikanz . . . . .	76
probabilistische Bewertung . . . . .	50	Simulation . . . . .	43
Probability of Detection . . . . .	44	Soft-Computing-Verfahren . . . . .	38, 54
Prognose . . . . .	17	Software . . . . .	150
prognostisch . . . . .	41	-spezifikation . . . . .	147
prognostische Variable . . . . .	35	Spezifität . . . . .	44
<b>Q</b>		Spread . . . . .	46
QPE . . . . .	33	State Updating . . . . .	42
QPF . . . . .	35	Stichprobe . . . . .	76
Quantifizierbarkeit . . . . .	34	Sturzflut . . . . .	16
Quantifizierungsfehler . . . . .	34	Subgruppenanalyse . . . . .	76
quantitative Niederschlagsvorhersage . . . . .	28, 35	<b>T</b>	
<b>R</b>		Teilscore . . . . .	154
Rücklaufquote . . . . .	76	Timing . . . . .	42
Radar . . . . .	33	Treffsicherheit . . . . .	43
RADOLAN . . . . .	34	True Negative . . . . .	44
RADVOR . . . . .	36	True Positive . . . . .	44
Reaktionszeit . . . . .	16	True Positive Rate . . . . .	44
Receiver Operating Characteristic . . . . .	44	<b>U</b>	
Regensammler . . . . .	33	Überflutung . . . . .	17
Reliability . . . . .	46	Überschwemmung . . . . .	16
Reliability Diagram . . . . .	47	unbeobachtete Einzugsgebiete . . . . .	52
Repräsentativität . . . . .	76	Unsicherheit . . . . .	48
Resilienz . . . . .	18	aleatorische Unsicherheit . . . . .	49
RIMAX . . . . .	58	epistemische Unsicherheit . . . . .	49
Risiko . . . . .	17	Inputparameterunsicherheit . . . . .	49
-kommunikation . . . . .	191	Modellparameterunsicherheit . . . . .	49
-management . . . . .	18	Modellstrukturunsicherheit . . . . .	51
ROC		prädiktive Unsicherheit . . . . .	50
ROC-Curve . . . . .	45	Prognoseunsicherheit . . . . .	50
ROC-Space . . . . .	44	Prozessparameterunsicherheit . . . . .	49
Root Mean Square Error (RMSE) . . . . .	45	Quellen . . . . .	51
<b>S</b>		Strukturunsicherheit . . . . .	49
Sättigungsüberschuss . . . . .	16	<b>V</b>	
Schärfe . . . . .	46	Validierung . . . . .	43
Schätzung . . . . .	41	Vb-Zugbahn . . . . .	173
		Verhaltensvorsorge . . . . .	19

Verifikation . . . . .	43
qualitativ . . . . .	97
quantitativ . . . . .	43, 97
Verlässlichkeit . . . . .	47
Verlässlichkeitsdiagramm . . . . .	47
Vertrauenswürdigkeit . . . . .	46, 47
Verzerrung . . . . .	46
Vorhersage . . . . .	17
-güte . . . . .	21
-horizont . . . . .	17
-problem . . . . .	21
-weite . . . . .	17
-zeitpunkt . . . . .	17
-zeitraum . . . . .	17
Niederschlagsvorhersage . . . . .	35
probabilistische Vorhersage . . . . .	35
Vulnerabilität . . . . .	18

**W**

WARNSIM . . . . .	55, 152
Warnung . . . . .	17
Entwarnung . . . . .	17
Frühwarnung . . . . .	14
Wetterwarnung . . . . .	29
WarnWetter . . . . .	29
Wellenablauf im Gerinne . . . . .	16
Wetterwarnung . . . . .	29
Wiederkehrintervall . . . . .	18
wild abfließendes Wasser . . . . .	17
Workflow . . . . .	148

**Z**

Z-R-Beziehung . . . . .	33
Zuverlässigkeit . . . . .	47, 48



**Herausgeber:**

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie  
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden

Telefon: +49 351 2612-0

Telefax: +49 351 2612-1099

E-Mail: [lfulg@smul.sachsen.de](mailto:lfulg@smul.sachsen.de)

[www.smul.sachsen.de/lfulg](http://www.smul.sachsen.de/lfulg)

Diese Veröffentlichung wird finanziert mit Steuermitteln auf Grundlage des von den Abgeordneten des Sächsischen Landtags beschlossenen Haushaltes.

**Redaktion:**

Abteilung Wasser, Boden, Wertstoffe

Referat Landeshochwasserzentrum, Gewässerkunde

Andy Philipp

Telefon: +49 351 8928-4505

Telefax: +49 351 8928-4099

E-Mail: [andy.philipp@smul.sachsen.de](mailto:andy.philipp@smul.sachsen.de)

[www.hochwasserzentrum.sachsen.de](http://www.hochwasserzentrum.sachsen.de)

**Autoren:**

Andy Philipp (Referat 45); außer Abschnitte/Kapitel 2.4.1 und 6:

Florian Kerl (Referat 45) sowie 1.2, 8.1.3 und 9: Florian Kerl und Andy Philipp

**Titelseite:**

Oberflächlicher Abfluss im oberen Einzugsgebiet der Wilden Weißeritz, aufgenommen am 04.06.2013; Foto: Norbert Prange (LTV)

**Gestaltung und Satz:**

Andy Philipp

**Redaktionsschluss:**

31.12.2017

**Bezug:**

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei unter [www.publikationen.sachsen.de](http://www.publikationen.sachsen.de) heruntergeladen werden.

**Verteilerhinweis**

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben. Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen.