

Operationelle Wasserhaushaltsmodellierung zur Hochwasservorhersage in Hessen

W3

GERHARD BRAHMER

1 Hochwasser und Hochwasservorsorge

Hochwasser in oberirdischen Fließgewässern entsteht durch starke Niederschläge, die ggf. verbunden mit einsetzender Schneeschmelze mit großem Anteil direkt zum Abfluss gelangen. Dabei kommt derjenige Niederschlagsanteil kurzfristig zum Abfluss, der nicht durch Verdunstung, Muldenverlust oder Bodeninfiltration im Einzugsgebiet zurückgehalten wird oder erst deutlich verzögert das Gebiet verlässt. Hochwasser ist somit ein natürlicher Bestandteil des Wasserkreislaufs und als solcher nicht vermeidbar. Hochwasser schaffen als treibende Kraft der Fließgewässerdynamik vielfältige gewässer- und auentypische Strukturen und tragen so zum Erhalt von Lebensraum für Pflanzen und Tiere bei. Die Natur kennt keine Hochwasserschäden, Schäden treten erst dann ein, wenn der Mensch durch intensive Nutzungsformen im Überschwemmungsgebiet vom Hochwasser betroffen ist.

Der zukunftsweisende Hochwasserschutz baut auf den drei Säulen „Hochwasserflächenmanagement“, „Technischer Hochwasserschutz“ und „Hochwasser-

vorsorge“ auf (vgl. [1]). Durch Maßnahmen des Hochwasserflächenmanagements insbesondere aber durch technische Hochwasserschutzanlagen wie Rückhaltebecken und Deiche lässt sich ein Hochwasserschutz lediglich bis zum Bemessungshochwasser bzw. dem Ausbaugrad der Hochwasserschutzanlagen sicherstellen. Treten größere Hochwasser auf oder sind keine ausreichenden Hochwasserschutzanlagen vorhanden, ist es von entscheidender Bedeutung, dass Instrumente der Hochwasservorsorge zur Verfügung stehen und genutzt werden können. Dabei stellen Hochwasserinformationen und Hochwasservorhersagen elementare Bestandteile der weitergehenden Hochwasservorsorge dar. Sind aktuelle und zu erwartende Wasserstände eines Hochwasserereignisses frühzeitig bekannt, kann die Zeit zwischen dem Anlaufen eines Hochwassers und dem Eintreten kritischer Wasserstände zur Schadensvermeidung und Schadensminimierung genutzt werden. Die zunehmende Bedeutung des Hochwasserschutzes hat ihren Ausdruck in der EU-Hochwasserrisikomanagementrichtlinie gefunden [2].

2 Erstellung der Wasserhaushaltsmodelle für Hessen

Als Werkzeug für die Erstellung von Abflussvorhersagen kommen zunehmend Wasserhaushaltsmodelle zum Einsatz, die im Gegensatz zu ereignisbezogenen Flussgebietsmodellen eine kontinuierliche Simulation aller Prozesse, die mit den Wasserflüssen in einem Einzugsgebiet verbundenen sind, durch-

führen. Dies ermöglicht eine Simulation nicht nur für einzelne Hochwasserereignisse, sondern für den ganzen Abflussbereich vom Niedrigwasser über Mittelwasser bis zum Hochwasser. Ein weiterer Vorteil der Wasserhaushaltsmodelle ist die laufende Mitführung bzw. Aktualisierung der Wasservorräte in

allen Teilspeichern des Modells (Pflanzenbenetzung, Bodenwasser in unterschiedlichen Tiefen, Grundwasservorrat, aktueller Füllungszustand der Gewässer), so dass eine Vorhersageberechnung immer auf den aktuellen hydrologischen Zuständen in den Einzugsgebieten der hessischen Gewässer aufsetzen kann und eine ereignisbezogene Aneicherung von Modellparametern entfällt. Da diese Vorfeuchtebedingungen (insbesondere im Boden) für alle Teilgebiete simuliert werden und damit die Abflussbereitschaft dieser Flächen eingeordnet werden kann, können auf Basis von Niederschlagsvorhersagen auch Hochwasserfrühwarnungen für kleinere Einzugsgebiete, für die keine Pegelbeobachtungen vorliegen, erstellt werden.

Für Hessen wurden drei Wasserhaushaltsmodelle auf Basis des Modells LARSIM (Large Area Runoff Simulation Modell) [3] aufgestellt: Das Lahnmodell, das Modell für das hessische Rhein- und Maingebiet und das Modell für den hessischen Wesergebietsanteil (vgl. Abb. 1). Für die Modellerstellung wurden umfangreiche detaillierte Gebietsdaten (Wasserscheiden, Gewässernetz, Höhenmodell, Landnutzung, Bodenart, usw.) in einem Geographischen Informationssystem zusammengeführt und zu Modellsystemdaten, die die einzelnen zu modellierenden Teilgebietsflächen repräsentieren, aufbereitet. Die Landesfläche von Hessen (zzgl. der außerhessischen Anteile der Flussgebiete von Lahn, Eder und Diemel) wird durch rund 4 500 Teilgebietsflächen mit einer durchschnittlichen Größe von 4 bis 5 km² in den Modellen abgebildet.

Im Modell LARSIM werden die Wasserflüsse in den Teileinzugsgebieten ausgehend vom fallenden Niederschlag über die Benetzung und die Verdunstung der Pflanzen, ggf. dem Aufbau und Abschmelzen einer Schneedecke, der Versickerung in den Boden und das Grundwasser, bis hin zum Gewässerabfluss mit einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde simuliert (vgl. Abb. 2). Innerhalb der Teilflächen werden alle dort vorkommenden Kombinationen aus unterschiedlicher Landnutzung und Bodenart getrennt simuliert und die resultierenden Wasserflüsse an die folgende Teilfläche übergeben. Im Gewässer erfolgt

die Simulation des Wellenablaufs zur nächsten Teilfläche in Abhängigkeit der Gewässerlänge, der Gefälleverhältnisse und der morphometrischen Ausprägung des Gewässerbetts. Der Einfluss von Hochwasserrückhaltebecken und Talsperren wird über separate Speicherbausteine entsprechend der Bauwerksdimensionen und der jeweiligen Steuerregel berücksichtigt. Insgesamt sind 47 Hochwasserrückhalteanlagen in den Modellen abgebildet. Für 64 Pegelmessstellen, für die im Modell auch Modellknoten zur Ergebnisausgabe existieren, konnte das Modell über einen zehnjährigen Zeitraum (1994 bis 2003) anhand des Vergleichs von Messwerten und Simulationsergebnissen kalibriert und validiert werden. Mit den aufgestellten Modellen können unterschiedliche wasserwirtschaftliche Fragestellungen von der Bereitstellung von Abflusswerten an beliebigen Modellknoten (bzw. Gewässerquerschnitten), für die keine Messwerte vorliegen, bis hin zur Untersuchung der Auswirkung von Einflüssen des Klimawandels auf die Abflussverhältnisse an hessischen Gewässern bearbeitet werden.



Abb. 1: Wasserhaushaltsmodell Wesergebiet mit Ausgabepegeln.

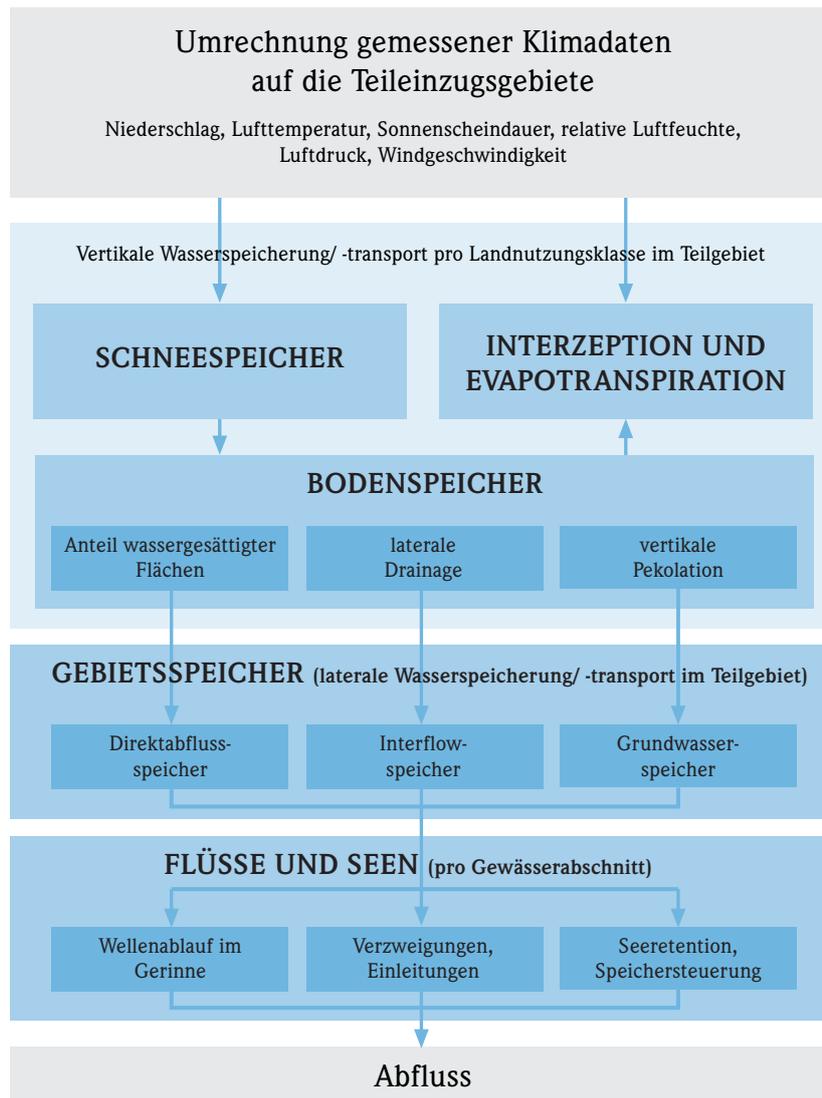


Abb. 2: Strukturschema zum Wasserhaushaltsmodell LARSIM (verändert nach [3]).

3 Erstellung von operationellen Abfluss- und Wasserstandsvorhersagen

Voraussetzung für ein operationelles Vorhersagesystem ist neben der Verfügbarkeit der aufgestellten Modelle der Betrieb von Messnetzen zu hydrologischen und meteorologischen Kenngrößen sowie ein aktueller Zugriff auf die erfassten Daten per Datenfernübertragung. Aus dem hessischen Pegelmessnetz können die aktuellen Wasserstände abgerufen und über spezifische Schlüsselkurven in Abflüsse umgerechnet werden. Niederschlagsinformationen

werden aus dem hessischen Ombrometermessnetz sowie dem Messnetz des Deutschen Wetterdienstes herangezogen. Die insbesondere für die Ermittlung der Verdunstung aber auch für die Unterscheidung zwischen Regen und Schnee erforderlichen meteorologischen Parameter (Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Sonnenscheindauer, Windgeschwindigkeit und Luftdruck) werden vom Deutschen Wetterdienst aus dessen synoptischem Messnetz bereitge-

stellt. Mit den o. g. Daten kann der Wasserhaushalt mit den unterschiedlichen Wasserflüssen der in den Modellen enthaltenen Teilgebieten hessischer Gewässer für den vorangegangenen Zeitraum simuliert werden.

Ab dem Vorhersagezeitpunkt sind wiederum entsprechende hydrometeorologische Daten für den Vorhersagezeitraum erforderlich, um mit dem Modell in die Zukunft zu rechnen und entsprechende Abfluss- und Wasserstandsvorhersagen erstellen zu können. Dazu werden die Ergebnisse aus den numerischen Wettervorhersagemodellen des Deutschen Wetterdiensts [4] von einem zentralen Datenserver abgerufen und modellspezifisch aufbereitet. Aufgrund der anwachsenden Unsicherheit der numerischen Wettervorhersagen mit zunehmender Vorhersagedauer sind auch die Abflussvorhersagen für längere Vorhersagezeiträume mit größeren Unsicherheiten behaftet. Die mit den Wasserhaushaltsmodellen simulierten Abflüsse für die nächsten Stunden resultieren überwiegend noch aus den bereits gefallenen (und gemessenen) Niederschlägen und stellen somit relativ sichere Vorhersagen dar. Die qualitativ besten numerischen Wettervorhersagen die dann die Wasserhaushaltsmodelle antreiben stammen aus dem Kurzfristmodell (COSMO-DE) mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung und reichen 18 Stunden in die Zukunft. Das Kurzfristmodell (COSMO-EU) weitet den Vorhersagezeitraum auf 48 bzw. 72 Stunden aus, während die Informationen aus dem Mittelfristmodell (GME) des DWD mit deutlich gröberer Auflösung noch Abschätzungen für bis zu sieben Tage in die Zukunft ermöglichen.

3.1 Datenflüsse und Modellbetrieb

Das Datenmanagement und die Datenhaltung der erforderlichen hydrometeorologischen Zeitreihen erfolgt im zentralen wasserwirtschaftlichen Informationssystem WISKI, das vom HLUG betrieben wird. Die Daten aus den Stationsmessnetzen werden in zyklischen Abständen abgerufen und so laufend aktualisiert. Für die operationelle Wasserhaushaltssimulation kommen derzeit folgende stationsbezogene Zeitreihen in ständig aktualisierter Form zum Einsatz:

- 64 Pegel mit Wasserstands- und Abflusswerten

- 15 Zeitreihen zu Inhalten und Abgaben von Talsperren und Hochwasserrückhaltebecken
- 172 Niederschlagsstationen
- 72 Stationen für die Lufttemperatur
- 81 Stationen für die relative Luftfeuchte
- 38 Stationen für die Sonnenscheindauer
- 38 Stationen für die Windgeschwindigkeit
- 25 Stationen für den Luftdruck

Dabei werden alle Zeitreihen auf ein einheitliches Zeitintervall von einer Stunde aggregiert und je Parameter in einem für die Wasserhaushaltsmodelle spezifischen Datenformat für die Modellanwendung exportiert.

In weiteren Datenaufbereitungsschritten werden die Zeitreihen mit unterschiedlichen Hilfsprogrammen auf Vollständigkeit und Plausibilität geprüft und ggf. von der weiteren Verwendung durch Kennzeichnung als Datenlücke ausgeschlossen. Im nächsten Schritt werden die stationsbezogenen hydrometeorologischen Zeitreihen mittels geostatistischen Verfahren auf ein 1-km²-Raster interpoliert, so dass die einzelnen Modellteilgebiete mit zutreffenden lokalen Kenngrößen versorgt werden können. Mit den so aufbereiteten Eingangsgrößen werden die Wasserhaushaltsmodelle automatisiert zeitgesteuert gestartet und die Simulationsläufe durchgeführt. Als zentrales Ergebnis werden für die Vorhersagepegel Zeitreihen der Abflüsse und Wasserstände ausgegeben. Diese Ergebnisdateien werden mit weiteren Hilfsprogrammen in tabellarische Übersichten, Gangliniengrafiken und Warnkarten umgesetzt und in einem internetbasiertem Visualisierungssystem bereitgestellt. Dabei werden insbesondere Überschreitungen von Hochwassermeldehöhen überprüft und graphisch hervorgehoben. Derzeit werden entsprechend der aufgezeigten Prozesskette täglich zwei Modellläufe durchgeführt, die je nach hydrologischer Situation bis hin zu einem stündlichen Modellbetrieb ausgeweitet werden können.

3.2 Wasserhaushaltssimulation

Ausgangspunkt einer jeden Vorhersagesimulation ist eine aus einer vorangegangenen Simulation erzeugte Zustandsdatei, in der für alle Teilgebiete die Wasserfüllungen aller Modellkompartimente zu einem definierten Zeitpunkt abgelegt sind. Somit sind die Ge-

bietsanfangsbedingungen bekannt und eine längere Simulation für den vergangenen Zeitraum kann entfallen. Mit den eingelesenen hydrometeorologischen Daten der letzten 48 Stunden wird dann eine Wasserhaushaltssimulation durchgeführt. Die für die Kontrollpegel simulierten Abflüsse werden dann mit den gemessenen Abflussdaten verglichen. Insbesondere durch Unterschiede zwischen den punktuell erfassten Niederschlagsdaten und den real gefallenen Gebietsniederschlägen können sich hier Abweichungen ergeben. Je nach Ausmaß der Abweichung und der vorherrschenden hydrologischen Situation (Niedrigwasser- bis Hochwasserabfluss) erfolgt eine automatisierte Modellnachführung mit iterativ verändertem Wasserdargebot (Anpassung an tatsächliche Gebietsniederschläge oder ggf. auftretende Abschmelzraten einer Schneedecke) oder mit veränderten Wasserinhalten der Gebietsspeicher, bis eine genügend genaue Anpassung an die gemessenen Abflüsse erfolgt ist. Dann kann davon ausgegangen werden, dass zum Vorhersagezeitpunkt die hydrologischen Verhältnisse in den Teileinzugsgebieten der Gewässer im Modell realitätsnah abgebildet sind. Dieser Gebietszustand wird wiederum für eine spätere Simulation als Zustandsdatei abgespeichert. Die sich nun anschließende Simulation für den Vorhersagezeitraum wird mit den hydrometeorologischen Daten aus den numerischen Wettervorhersagemodellen des DWD für die nachfolgenden sieben Tage angetrieben. Die Simulationsergebnisse werden für alle vorgegebenen Modellausgabeknoten (insbesondere für Warnpegel) in einer Zeitreihe mit stündlicher Auflösung ausgegeben.

3.3 Ergebnisse aus den Wasserhaushaltsmodellen

Grundsätzlich werden im Wasserhaushaltsmodell Abflüsse simuliert und durch das Gewässersystem geleitet. In Abb. 3 sind die beobachteten Abflüsse am Pegel Bad Hersfeld/Fulda als blaue Ganglinie dargestellt. Die graue Ganglinie repräsentiert die für diesen Zeitraum mit meteorologischen Messdaten simulierte Abflussganglinie nach der Modellnachführung. Ab dem Vorhersagezeitpunkt (24.11. 13 Uhr) werden die simulierten Abflüsse für den nachfolgenden Vorhersagezeitraum (grüne Line) dargestellt. Die schwarze Linie zeigt die Ergebnisse

einer weiteren Szenario-Simulation, bei der für den Vorhersagezeitraum keine Niederschläge angenommen werden. Bis zum Erreichen des Abflussscheitels werden die vorhergesagten Abflüsse überwiegend aus bereits gefallen Niederschlägen erzeugt und sind somit als relativ sicher anzusehen. Ab dem Zeitpunkt, an dem die grüne und die schwarze Linie auseinanderlaufen, resultieren die vorhergesagten Abflüsse (grüne Linie) aus der Simulation mit den vorhergesagten meteorologischen Daten. Für den Hochwasserwarndienst werden die simulierten Abflüsse über im Modell hinterlegte Wasserstands-Abflussbeziehungen in Wasserstandsganglinien an den Vorhersagepegeln umgerechnet. In Abb. 4 sind die resultierenden Wasserstandsganglinien für den Pegel Bad Hersfeld dargestellt. Aus dem Verlauf ist zu erkennen, dass dort am 25.11. gegen 00 Uhr der höchste Wasserstand gerade noch die Hochwasser-meldestufe I unterschreitet. Einen Gesamtüberblick über die Vorhersagepegel des Lahngebiets zeigt

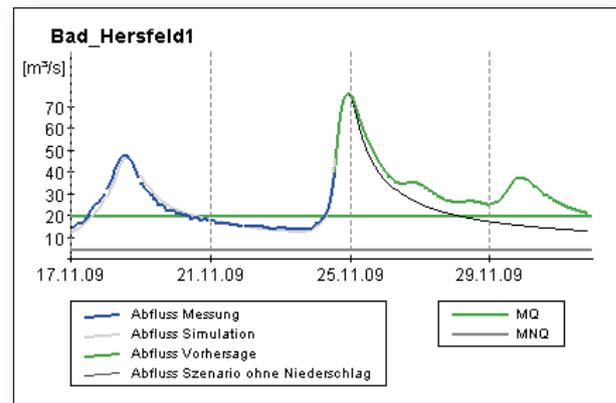


Abb. 3: Abflussganglinien aus dem Simulationslauf vom 24.11. 13 Uhr für den Pegel Bad Hersfeld Fulda.

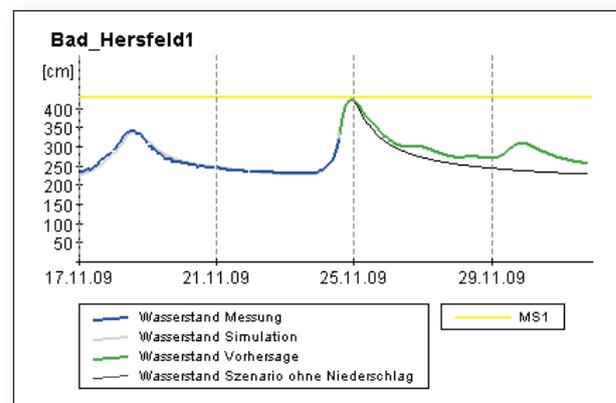


Abb. 4: Abflussganglinien aus dem Simulationslauf vom 24.11. 13 Uhr für den Pegel Bad Hersfeld Fulda.

WHM Lahn: Vorhergesagte Pegelwasserstände in cm

Vorhersagezeitpunkt (VZP): 24.11.2009 13:00 (Angaben in MEZ)

Pegel	VZP	Maximum in VZP + 24h		Maximum in VZP + 48h		VZP + 6h	VZP + 12h	VZP + 18h	VZP + 24h	VZP + 48h	VZP + 72h
Feudingen/Lahn	57	59	24.11.2009 16:00	59	24.11.2009 16:00	58	56	54	52	50	51
Biedenkopf/Lahn	92	91	24.11.2009 14:00	91	24.11.2009 14:00	89	84	79	75	69	66
Sarnau/Lahn	153	152	24.11.2009 14:00	152	24.11.2009 14:00	148	145	141	136	130	123
Ober-Ofeiden/Ohm	140	137	24.11.2009 14:00	137	24.11.2009 14:00	128	119	110	102	97	85
Bartenhausen/Wohra	170	168	24.11.2009 14:00	168	24.11.2009 14:00	162	155	149	143	136	127
Marburg/Lahn	295	298	24.11.2009 15:00	298	24.11.2009 15:00	294	282	272	262	243	226
Gießen-Klarwerk/Lahn	387	426	24.11.2009 21:00	426	24.11.2009 21:00	423	422	409	395	354	330
Haiger/Dill	49	49	24.11.2009 14:00	49	24.11.2009 14:00	49	47	45	43	42	46
Dillenburg1/Dill	38	38	24.11.2009 14:00	38	24.11.2009 14:00	37	35	33	31	29	30
Aßlar/Dill	123	121	24.11.2009 14:00	121	24.11.2009 14:00	114	110	105	100	93	87
Leun/Lahn	331	372	25.11.2009 03:00	372	25.11.2009 03:00	347	369	366	348	297	274
Essershausen/Weil	30	32	24.11.2009 23:00	32	24.11.2009 23:00	30	32	31	29	26	23
Niederbrechen/Emsbach	48	49	24.11.2009 20:00	49	24.11.2009 20:00	48	49	47	46	45	43
Diez/Lahn	167	226	25.11.2009 09:00	226	25.11.2009 09:00	197	212	224	224	182	162
Zollhaus/Aar	49	50	24.11.2009 17:00	50	24.11.2009 17:00	49	48	47	46	44	42
Kalkofen_Neu/Lahn	268	331	25.11.2009 11:00	331	25.11.2009 11:00	297	315	327	331	290	268
Weinähr/Gelbach	48	49	24.11.2009 19:00	49	24.11.2009 19:00	49	48	46	44	42	40
Schulmühle/Muehlb.	59	60	24.11.2009 16:00	60	24.11.2009 16:00	60	59	58	57	57	56

Meldestufen: ■ 1 ■ 2 ■ 3

Abb. 5: Übersicht der Vorhersageergebnisse an Pegeln im Lahngebiet.

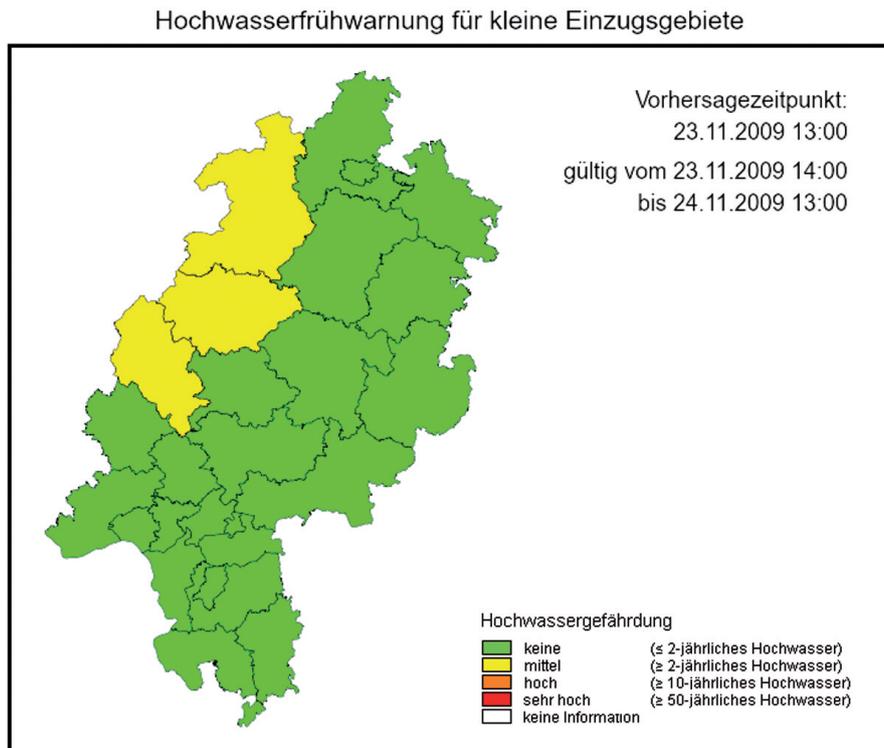


Abb. 6: Hochwasserwarnkarte Hessen.

Abb. 5, in der die Wasserstände zum Vorhersagezeitpunkt, die maximal vorhergesagten Wasserstände in den kommenden 24 bzw. 48 Stunden und die Wasserstände zu weiteren definierten Zeitpunkten zusammengestellt sind. Bei Überschreitung von Hochwassermeldestufen werden die Tabellenfelder entsprechend der jeweiligen Meldestufe farbig hinterlegt.

Für Gewässer kleinerer Einzugsgebiete an denen keine Pegel existieren, werden Warnkarten zur Abschätzung der Hochwasserentwicklung erzeugt. Dazu werden die an allen ca. 4 500 Modellknoten in

Hessen vorhergesagten Scheitelabflüsse mit den dort über eine landesweite Hochwasserregionalisierung [5] ermittelte Hochwassereinstufung verglichen. Aggregiert auf die hessischen Landkreise werden die Ergebnisse dann in Hochwasserwarnstufen klassifiziert und dargestellt. Abb. 6 zeigt eine solche Warnkarte für den 23.11. 13 Uhr, in der für die kommenden 24 Stunden in nordwestlichen Landkreisen in Hessen mit Hochwasserabflüssen zu rechnen ist, die in ihrem Ausmaß etwa einem mittleren (ca. 2-jährlichen) Hochwasser entsprechen. Eine weitere Karte wird zusätzlich für den danach folgenden 24-stündlichen Zeitraum erstellt.

4 Ausblick

Hochwasservorhersagen sind nur nutzbringend, wenn sie von allen Beteiligten als Entscheidungs- und Handlungsgrundlage akzeptiert werden. Seit November 2009 laufen die Wasserhaushaltsmodelle in einem operationellen Testbetrieb. Die dabei gewonnenen Erfahrungen dienen zur Einschätzung der Vorhersagegüte, pegelspezifischer Vorhersagezeiträume und insbesondere einer fortlaufenden Op-

timierung der Modelle. Zukünftig sollen die Vorhersagen aus den Wasserhaushaltsmodellen den Hochwasserwarn- und Meldedienst der hessischen Wasserwirtschaftsverwaltung unterstützen. Über eine Internetpräsentation sollen die Vorhersagen als Instrument des vorsorgenden Hochwasserschutzes der Öffentlichkeit bereitgestellt werden.

5 Literatur

- [1] Hessisches Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz (2007): Landesaktionsplan Hochwasserschutz Hessen. Wiesbaden, 42 S.
- [2] RICHTLINIE 2007/60/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTES UND DES RATES vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken, Amtsblatt der Europäischen Union, 6.11.2007, L288/27–34.
- [3] BREMICKER, M. (2000): Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 11, 119 S.
- [4] DEUTSCHER WETTERDIENST, Numerische Wettervorhersagemodelle:
http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=_dwdwww_aufgabenspektrum_vorhersagedienst&activePage=
- [5] BRAHMER, G. (2009): Regionalisierung von Hochwasserkenngrößen in Hessen. Jahresbericht 2008 des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie, 41–50, Wiesbaden.

